

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Josip Bego**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zvonko Herold, dipl. ing.

Student:

Josip Bego

Zagreb, 2017.



Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Zvonku Heroldu te dr. sc. Matiji Hoiću, mag.ing. na uloženom trudu, pruženoj pomoći i korisnim savjetima tokom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem svojoj obitelji; mami Vesni, tati Ivanu, sestri Margareti na bezuvjetnoj moralnoj i financijskoj podršci tijekom mog studija.

*Josip Bego*



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum 3 -07- 2017	Prilog
Klasa: 602-04/17-6/4	
Ur. broj: 15-1703-17-240	

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: Josip Bego

Mat. br.: 0035186512

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Uređaj za ispitivanje tarnih ploča suhih spojki

Naslov rada na engleskom jeziku: Test Rig for Characterization of Dry Clutch Friction Plates

Opis zadatka:

Potrebno je projektirati ispitni uređaj za identifikaciju karakteristika trenja i trošenja tarnih materijala suhe spojke. Projektirani sustav mora posjedovati sljedeće ili bolje karakteristike:

- ispitni uzorak: tarne ploče automobilske spojke s najmanjim unutarnjim / najvećim vanjskim promjerom tarne plohe: 150 / 300 mm,
- reaktivni elementi: komponente izrezane iz potisne ploče / zamašnjaka spojke,
- glavni pogon: servomotor s 400 Nm (najveći kratkotrajni okretni moment), najveća brzina vrtnje 3000 okr/min,
- održavanje temperature reaktivnih elemenata ostvariti sustavom vodenog hlađenja i električnog grijanja (grijačem),
- odvoditi zagrijani zrak i istrošene čestice sustavom zračnog hlađenja (ventilacija),
- potrebna mjerenja: brzine klizanja, normalne sile, momenta sile trenja, temperature reaktivnih elemenata, relativne aksijalne pozicije reaktivnih elemenata,
- mjerene parametre potrebno je kontinuirano bilježiti sustavom osjetnika sa zapisom na računalo.

Rad treba sadržavati:

1. Uvodno razmatranje o ispitnim postavama za identifikaciju karakteristika trenja.
2. Analizu i sintezu konstrukcijskog rješenja ispitnog uređaja.
3. Izbor optimalne varijante rješenja za zadane projektne zahtjeve.
4. Proračun kritičnih elemenata postava.
5. Sklopni crtež ispitnog postava s potrebnim presjecima i detaljima.
6. Radioničke crteže glavnog reaktivnog podsklopa.

Pri projektiranju treba rabiti važeće tehničke propise za sigurnost strojeva.  
U radu navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

11. svibnja 2017.

Rok predaje rada:

13. srpnja 2017.

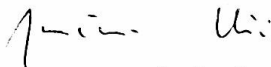
Predviđeni datum obrane:

19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao:

  
Prof. dr. sc. Zvonko Herold

Predsjednica Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	II
POPIS SLIKA .....	IV
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE .....	VII
POPIS OZNAKA .....	VIII
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY .....	XIII
1. UVOD.....	1
2. Razmatranje građe i izvedbi automobilskih suhih spojki.....	2
2.1. Izvedbe suhih spojki.....	2
2.1.1. Suha spojka s jednom tarnom pločom .....	2
2.1.2. Suha spojka s dvije tarne ploče .....	4
2.1.3. Dvostruka suha spojka .....	5
2.2. Građa automobilskih suhih spojki.....	6
2.2.1. Tarna ploča spojke .....	7
2.2.2. Sklop potisne ploče .....	9
2.2.3. Zamašnjak .....	10
2.2.4. Kompenzacija trošenja.....	11
3. PREGLED ISPITNOG POSTAVA PIN ON DISK METODE .....	13
4. PREGLED POSTOJEĆIH RASPOLOŽIVIH PODSUSTAVA .....	20
4.1. Pregled izvedbi senzora sile i momenta pogodnih za konstrukciju tribometra.....	20
4.2. Pregled elektromotora .....	29
4.3. Pregled aktuatora.....	30
4.3.1. Elektromehanički aktuatori .....	30
4.3.2. Pneumatski aktuator .....	32
4.3.3. Hidraulički aktuator .....	33
Hidraulički aktuator.....	33
4.4. Senzori temperature .....	34
4.5. Senzori položaja .....	35
5. Generiranje koncepata .....	36
5.1. Vertikalna os .....	36
5.1.1. Koncept 1 .....	36
5.1.2. Koncept 2 .....	37
5.1.3. Koncept 3 .....	38
5.1.4. Koncept 4 .....	39
5.1.5. Koncept 5 .....	40
5.1.6. Koncept 6 .....	41
5.1.7. Koncept 7 .....	42
5.2. Horizontalna os .....	43
5.2.1. Koncept 8 .....	43

5.2.2. Koncept 9 .....	44
5.3. Vrednovanje koncepata .....	45
6. Konstrukcijska razrada .....	48
6.1. Raspon vrijednosti normalne sile .....	48
6.2. Reaktivni član .....	50
6.2.1. Proračun i odabir senzora .....	50
6.2.1.1. Senzor 1 .....	52
6.2.1.2. Senzor 2 .....	53
6.2.1.3. Senzor 3 .....	53
6.2.2. Proračun sile stezanja te dosjednih vijaka .....	56
6.2.2.1. Proračun dosjednih vijaka .....	57
6.2.2.2. Proračun sile stezanja .....	59
6.2.2.3. Proračun hlađenja .....	60
6.2.2.4. Proračun elektrootpornog grijača .....	63
6.3. Pogonski sklop .....	66
6.3.1. Odabir elektromotora .....	66
6.3.2. Proračun elemenata pogona .....	69
6.3.2.1. Provjera naprezanja šupljeg vratila te provjera odabranih ležaja .....	71
6.3.2.2. Odabir steznog elementa .....	74
6.3.2.3. Provjera tlaka naležnih površina P4C profila adapter prstena .....	76
6.4. Sklop vodicica .....	77
6.4.1.1. Vodicica 1 .....	80
6.4.1.2. Vodicica 2 .....	80
6.4.1.3. Vodicica 3 .....	80
6.4.1.4. Vodicica 4 .....	80
6.4.1.5. Kontrola progiba .....	81
6.5. Izvedba sklop opruge i aktuatora .....	85
6.5.1.1. Odabir opruge .....	85
6.5.1.2. Odabir vodicica sklopa opruge te aksijalnih kliznih ležajeva .....	87
6.5.1.3. Odabir aktuatora .....	88
7. ZAKLJUČAK .....	89
LITERATURA .....	90
PRILOZI .....	92

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz izvedbi suhe spojke s jednom tarnom pločom [1] .....	3
Slika 2.	Suha automobilska spojka s dvije tarne ploče [2] .....	4
Slika 3.	Suha dvostruka spojka s elektrohidrauličkim aktiviranjem [4] .....	5
Slika 4.	Jednostruka suha automobilska spojka [3] .....	6
Slika 5.	Tanjuri spojke [3] .....	7
Slika 6.	Krivulja prigušivanja torzijskih vibracija [3] .....	9
Slika 7.	Značajka spojke [3] .....	10
Slika 8.	Dvomaseni zamašnjak (DMF) [3] .....	11
Slika 9.	Spojka s mehanizmom za kompenzaciju trošenja (SAC spojka) [5] .....	12
Slika 10.	Značajke klasične i SAC spojke [4] .....	12
Slika 11.	Skica Pin on disk metode [9] .....	13
Slika 12:	Primjeri rezultata mjerenja [12] .....	14
Slika 13.	Primjer rezultata mjerenja [12] .....	14
Slika 14:	Izvedba pin on disk tribometra [11] .....	15
Slika 15.	Izvedba nosača i pina tribometra [11] .....	15
Slika 16.	Parametri spojke i tribometra [11] .....	17
Slika 17.	Neravnomjerno zagrijavanje diska [10] .....	18
Slika 18.	Whetstoneov mjerni most [16] .....	21
Slika 19.	Princip piezoelektričnog efekta [15] .....	22
Slika 20.	Odgovarajući višeaksijalni senzor sile tvrtke Kistler [17] .....	23
Slika 21.	Odgovarajući višeaksijalni senzori sile tvrtke Kistler [17] .....	24
Slika 22.	Višeaksijalni dinamometar [17] .....	25
Slika 23.	Višeaksijalni dinamometar sile i momenta 9272 [17] .....	26
Slika 24.	Piezoelektrični senzor momenta [17] .....	27
Slika 25.	Senzori sile [17] .....	28
Slika 26.	Dijagram elektromotora 1FT6163-8SD7 [14] .....	29
Slika 27.	Dijagram elektromotora 1FT6163-8WD7 [14] .....	29
Slika 28.	Elektromehanički aktuator SKF [32] .....	30
Slika 29.	Tehnički podaci elektromehaničkih aktuatora [32] .....	31
Slika 30.	Pneumatski cilindri SMC [33] .....	32
Slika 31.	Hidraulički aktuatori [34] .....	33
Slika 32.	Senzor temperature [35] .....	34
Slika 33.	Senzor položaja [35] .....	35
Slika 34.	Koncept 1 .....	36
Slika 35.	Koncept 2 .....	37
Slika 36.	Koncept 3 .....	38
Slika 37.	Koncept 4 .....	39
Slika 38.	Koncept 5 .....	40
Slika 39.	Koncept 6 .....	41
Slika 40.	Koncept 7 .....	42
Slika 41.	Koncept 8 .....	43
Slika 42.	Koncept 9 .....	44
Slika 43.	Smještaj senzora reakcijskih sklopova u stroju .....	51
Slika 44.	Opterećenja na senzore .....	51
Slika 45.	Tehnički podaci senzora .....	55
Slika 46.	Težište reaktivnog elementa .....	56

Slika 47.	Izvedba sklopa reaktivnog elementa .....	57
Slika 48.	Dimenzije dosjednog vijka .....	57
Slika 49.	Dimenzije za proračun sile stezanja .....	59
Slika 50.	Izvedba kanala za hlađenje .....	62
Slika 51.	Dimenzije rashladnih kanala .....	62
Slika 52.	Smještaj elektrootprornih grijača .....	63
Slika 53.	Dužina putanje elektrootpornog grijača .....	64
Slika 54.	Izvedba pogonskog sklopa .....	66
Slika 55.	Dijagram odabranog elektromotora 1FT6163-8SD7 .....	67
Slika 56.	Dimenzije odabranog motora 1FT6163-8SD7 .....	68
Slika 57.	Dimenzije i opterećenja pogonskog sklopa .....	69
Slika 58.	Analitičko rješenje za gredu opterećenu .....	70
Slika 59.	Tehnički podaci odabranih kugličnih ležajeva [26] .....	72
Slika 60.	Izvedba odabranog steznog elementa .....	74
Slika 61.	Tehnički podaci odabranog steznog elementa .....	75
Slika 62.	Izmjere P4C profila .....	76
Slika 63.	Izvedba vodicica .....	77
Slika 64.	Tehnički podaci odabrane vodilice .....	78
Slika 65.	Opterećenja vodicica .....	79
Slika 66.	Konzola opterećena silom na kraju [30] .....	81
Slika 67.	Prikaz stroja sa reaktivnim pomičnim članom u krajnjem otvorenom položaju ...	83
Slika 68.	Dozvoljeni kut nagiba za sustav vodilice s kugličnim ležajevima [28] .....	84
Slika 69.	Izvedba sklopa opruge te smještaj aktuatora .....	85
Slika 70.	Tehnički podaci odabrane opruge [31] .....	86
Slika 71.	Tehnički podaci odabrane vodilice opruge [31] .....	87
Slika 72.	Tehnički podaci aksijalnog kliznog ležaja [31] .....	88
Slika 73.	Tehnički podaci odabranog aktuatora [32] .....	88

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrednovanje koncepata .....	47
Tablica 2. Slučajevi ispitivanja .....	48
Tablica 3. Raspon vrijednosti normalne sile .....	50
Tablica 4. Opterećenje senzora .....	54
Tablica 5. Ulazni parametri dosjednog vijka .....	58
Tablica 6. Ulazni parametri za proračun sile pritezanja .....	59
Tablica 7. Parametri za proračun hlađenja .....	61
Tablica 8. Parametri za proračun elektrootpronig grijača .....	65

**POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

BROJ CRTEŽA	Naziv iz sastavnice
1-00-00-00-JB	Uređaj za ispitivanje tarnih ploči suhih spojki
1-02-00-00-JB	Sklop opruge
1-04-00-00-JB	Sklop nepomičnog reaktivnog člana
1-05-00-00-JB	Sklop pomičnog reaktivnog člana
1-09-00-00-JB	Sklop vodicice
1-04-01-00-JB	Reaktivni član
1-04-01-01-JB	Prirubnica reaktivnog člana
1-04-01-02-JB	Izolacijski prsten
1-04-01-03-JB	Središnja ploča
1-04-01-04-JB	Klizna čahura
1-04-01-05-JB	Brtvena ploča
1-04-01-06-JB	Prihvat zamašnjaka/potisne ploče
1-04-01-07-JB	Potisna ploča
1-04-01-08-JB	Pritezni prsten
1-04-01-09-JB	Električni grijač



## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$F_t$	[N]	Tangencijalna sila
$F_N$	[N]	Normalna sila
$\mu$	-	Faktor trenja klizanja
$F_Z$	[N]	Komponenta sile u smjeru osi Z
$F_X$	[N]	Komponenta sile u smjeru osi X
$F_Y$	[N]	Komponenta sile u smjeru osi Y
$p$	[Pa]	Tlak
$A_{sp}$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina spojke
$A_t$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina ispitnog uzroka na tribometru
$r_m$	[mm]	Ekvivalentni radijus
$r_v$	[mm]	Vanjski radijus plohe
$r_u$	[mm]	Unutarnji radijus plohe
$z$	-	Broj tarnih ploha
$T_{\max}$	[Nm]	Maksimalni okretni moment doveden spojkom
$T_{\min}$	[Nm]	Minimalni okretni moment doveden spojkom
$r_s$	[mm]	Radijus na kojem su postavljeni senzori
$T_o$	[Nm]	Okretni moment prenesen na reaktivne članove
$S$	-	Faktor sigurnosti
$F_o$	[N]	Obodna sila
$F_G$	[N]	Sila uslijed mase komponenata
$d_v$	[mm]	Promjer vijka
$D$	[mm]	Promjer rasporeda vijaka
$i$	-	Broj vijaka
$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina presjeka tijela vijka
$F_Q$	[N]	Smična sila po vijku
$\tau_s$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Smično naprezanje
$\sigma_1$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Tlak na površinu tijela vijka
$\tau_{s \text{ dop}}$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Dopušteno smično naprezanje
$\sigma_{1 \text{ dop}}$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Dopušteni tlak

$R_e$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Granica tečenja
$R_v$	[mm]	Vanjski radijus nalijeganja ploče
$R_u$	[mm]	Unutarnji radijus nalijeganja ploče
$S_H$	-	Faktor sigurnosti prijanjanja
$m$	-	Broj dodirnih ploha
$F_v$	[N]	Sila u vijku
$F_Z$	[N]	Gubitak sile uslijed slijeganja površina spoja
$F_M$	[N]	Sila prednaprezanja vijka
$F_{M \text{ dop}}$	[N]	Dopuštena sila prednaprezanja
$R_{Sr}$	[mm]	Srednji radijus djelovanja sile trenja
$\phi_{hl}$	[W]	Toplinski tok doveden hlađenjem
$P_{trenja}$	[W]	Snaga disipirana trenjem
$q_m$	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$	Maseni protok
$c_w$	$\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$	Toplinski kapacitet vode
$T_{iz}$	[K]	Izlazna temperatura vode
$T_{ul}$	[K]	Ulazna temperatura vode
$q_v$	$\left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$	Volumenski protok
$\rho_v$	$\left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	Gustoća vode
$A_0$	[mm <sup>2</sup> ]	Površina presjeka kanal za hlađenje
$n$	-	Broj kanal
$b$	[mm]	Širina kanala
$h$	[mm]	Visina kanala
$v$	$\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$	Brzina klizanja
$\vartheta_{iz}$	[°C]	Izlazna temperatura vode
$\vartheta_{ul}$	[°C]	Ulazna temperatura vode
$P$	[W]	Snaga elektrootpornog grijača
$Q$	[J]	Toplina
$t$	[min]	Vrijeme zagrijavanja
$c_{\text{čelika}}$	$\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$	Toplinski kapacitet čelika
$m_{\text{reaktivnog}}$	[kg]	Masa reaktivnog sklopa

$I$	[A]	Struja
$U$	[V]	Napon mreže
$R$	[ $\Omega$ ]	Otpor
$l$	[mm]	Dužina grijača
$d_{grijača}$	[mm]	Promjer grijača
$q$	$\left[ \frac{\text{W}}{\text{mm}^2} \right]$	Gustoća toplinskog toka
$F_t$	[N]	Tangencijalna komponenta sile
$a$	[mm]	Dužina grede između oslonaca
$b$	[mm]	Dužina prepusta grede
$M_A$	[Nm]	Moment oko točke A
$M_B$	[Nm]	Moment oko točke B
$M_f$	[Nm]	Moment fleksije
$F_G$	[N]	Sila uslijed težine
$F_{V1}$	[N]	Vertikalna komponenta sile u osloncu 1
$F_{V2}$	[N]	Vertikalna komponenta sile u osloncu 2
$W_t$	$\left[ \text{mm}^3 \right]$	Torzijski moment otpora
$W_X$	$\left[ \text{mm}^3 \right]$	Moment otpora oko osi X
$\tau_t$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Smično naprezanje uslijed torzije
$\sigma_f$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Naprezanje uslijed savijanja
$L_{10h}$	[h]	Nazivni vijek trajanja ležaja
$n_m$	[okr/min]	Brzina vrtnje ležaja
$C$	[N]	Nosivost ležaja
$P$	[N]	Ekvivalentno opterećenje ležaja
$p$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Tlak između naležnih površina P4C profila
$l_t$	[mm]	Dužina P4C spoja
$d_r$	[mm]	Proračunski promjer
$e_r$	[mm]	Ekscentricitet P4C profila
$T$	[Nm]	Preneseni okretni moment
$p_{dop}$	$\left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$	Dopušteni tlak
$S_0$	-	Statički faktor sigurnosti
$C_0$	[N]	Statička nosivost vodilice

---

$P_0$	[N]	Ekvivalentno statičko opterećenje
$w_Y$	[mm]	Progib u smjeru osi Y
$w_Z$	[mm]	Progib u smjeru osi Z
$\alpha_A$	[rad]	Nagib linije savijanja
$E$	[Pa]	Modul elastičnosti
$I_Z$	$[\text{mm}^4]$	Moment tromosti s obzirom na os Z
$I_Y$	$[\text{mm}^4]$	Moment tromosti s obzirom na os Y

## **SAŽETAK**

Cilj ovog diplomskog rada je konstrukcijsko rješenje uređaja za ispitivanje tarnih ploča suhih spojki. Dano rješenje mora omogućiti mjerenje brzine klizanja, normalne sile, momenta sile trenja, održavanje temperature reaktivnih elemenata te relativne aksijalne pozicije reaktivnih elemenata tokom izvođenja pokusa identifikacije faktora trenja i trošenja materijala suhih spojki. Kao ispitni uzorak koristi se čitava tarna ploča s najmanjim unutarnjim /najvećim vanjskim promjerom tarne plohe 150/300 mm pogonjena servomotorom s 400 Nm i najvećom brzinom vrtnje 3000 okr/min gdje se kao reaktivni elementi koriste komponente izrezane iz potisne ploče i/ili zamašnjaka. Održavanje temperature ostvaruje se sustavom vodenog hlađenja i elektrootpornih grijača. Rad obuhvaća pregled građe automobilskih suhih spojki, postojećih rješenja ispitnog sustava za identifikaciju karakteristika trenja s njihovim prednostima i nedostacima pri čemu je na temelju utvrđenih nedostataka postojećih rješenja izvedena faza koncipiranja gdje je odabran koncept s najviše potencijala te je izvedena njegova konstrukcijska razrada.

Ključne riječi: mjerenje normalne sile, mjerenje brzine klizanja, mjerenje momenta sile trenja identifikacija faktora trenja, koncipiranje i konstrukcijska razrada, uređaj za ispitivanje tarnih ploči spojki.

## **SUMMARY**

Goal of this master thesis is design of test rig for characterization of dry clutch friction plates. Given test rig design must enable measurement of sliding speed, normal force, friction torque, maintaining temperature of reactive components through the test of friction identification and wear measurements on dry clutch friction materials. As test sample, whole dry clutch friction plate with minimum inner /maximum outer friction plate diameter 150/300 mm is used. It is driven by servo electric motor with 400 Nm of torque and maximum rotation speeds of 3000 rpm where reactive segments are cut out from pressure plate and/or flywheel. Temperature maintaining is achieved by water cooling system and electric heaters. Thesis comprises overview of dry clutch basic structure, existing test rig design for characterization of friction with its advantages and disadvantages whereas concept development is made on basis of prior test rig disadvantages and where most promising concept is taken in design phase.

Key words: dry clutch friction plate, sliding speed measurement, normal force measurement, friction torque measurement, characterization of friction coefficient, design and development, test rig for characterization of dry clutch friction plates

## 1. UVOD

Suhe automobilske spojke i dalje su najzastupljeniji tip spojki u automobilima zbog svoje pouzdanosti i niže cijene izrade. Karakteristike trenja tarnih materijala suhe spojke i kočnica se zbog svoje složene fizikalne podloge u pravilu određuju eksperimentalnim metodama. U primjeni su različita rješenja ispitnih strojeva pri čemu većinu obilježava kombinacija relativno jednostavne mehaničke konstrukcije i pogona te minimalni broj osjetnika. Prednost ovakvih rješenja leži u prvom redu u nižim troškovima izrade i održavanja dok je glavni nedostatak dugotrajnost izvođenja pokusa obzirom da je za svaku kombinaciju operativnih parametara potrebno provesti zaseban pokus. U ovom radu izvršit će se projektiranje uređaja za identifikaciju karakteristika trenja i trošenja tarnih materijala suhe spojke na temelju nove koncepcije uređaja koja za razliku od dosadašnjih postojećih rješenja otklanja mogućnost utjecaja geometrije na rezultate ispitivanja, vršenjem ispitivanja na uzorku cijele tarne ploče spojke pri čemu nova koncepcija uređaj mora posjedovati sljedeće karakteristike:

- ispitni uzorak: tarne ploče automobilskih spojki s najmanjim unutarnjim / najvećim vanjskim promjerom tarne plohe: 150/ 300 mm
- reaktivni elementi: komponente izrezane iz potisne ploče / zamašnjaka spojke,
- glavni pogon: servomotor s 400 Nm (najveći kratkotrajni okretni moment), najveća brzina vrtnje 300 okr/min,
- održavanje temperature reaktivnih elemenata ostvariti sustavom vodenog hlađenja i električnog grijača (grijačem),
- odvoditi zagrijani zrak i istrošene čestice sustavom zračnog hlađenja (ventilacija),
- potrebna mjerenja: brzine klizanja, normalne sile, momenta sile trenja, temperature reaktivnih elemenata, relativne aksijalne pozicije reaktivnih elemenata,
- mjerenja parametara potrebno je kontinuirano bilježiti sustavom osjetnika sa zapisom na računalo.

## 2. Razmatranje građe i izvedbi automobilskih suhih spojki

Kako je tema ovog rada projektiranje uređaja za identifikaciju karakteristika trenja i trošenja tarnih materijala suhe spojke pri čemu se kao ispitni uzorak primjenjuje tarna ploča suhe automobilske spojke, dimenzija tarne plohe 150/300mm prethodno je potrebno razmotriti građu i princip rada automobilske suhe spojke.

### 2.1. Izvedbe suhih spojki

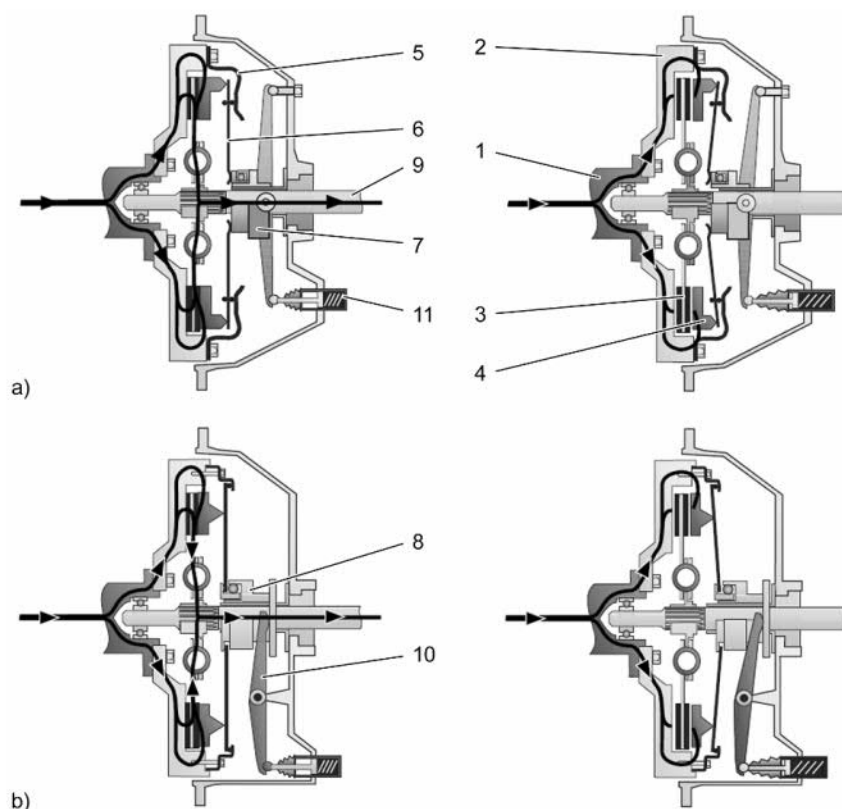
Suhe spojke u transmisijama motornih vozila koja su pokretana motorom s unutarnjim izgaranjem izvršavaju niz zadaća kao što su prijenos okretnog momenta s motora na mjenjač, glatko pokretanje motornog vozila iz stanja mirovanja, brzo i potpuno prekidanje toka momenta prilikom promjena stupnjeva prijenosa te ponovno uspostavljanje toka momenta, prigušivanje udara i vibracija uslijed torzije te zaštita motora i transmisije od preopterećenja. Prijenos okretnog momenta ostvaren je silom trenja između dvaju diskova pod djelovanjem normalne sile. Pritom upravljanje normalnom silom omogućava postupno povećanje/smanjenje prijenosa okretnog momenta, tj. određenog stupnja proklizavanja, čiji je rezultat postepeno izjednačavanje brzine rotacije pogonskog i gonjenog elementa kod uključivanja ili postepeno usporavanje gonjene strane kod isključivanja spojke.

U odnosu na ostale tipove spojki koje su zastupljene kod motornih vozila s unutarnjim izgaranjem kao što su uljne tarne spojke te hidrodinamske spojke, suhe spojke karakteriziraju niži troškovi proizvodnje, pouzdanost te manji gubici energije u radu. Međutim, suhe spojke se zbog nedostatka dodatnog rashladnog medija brže zagrijevaju te zbog toga imaju niže kapacitete okretnog momenta. Daljnji nedostatak suhe spojke jest varijabilnost suhog faktora trenja što uzrokuje vibracije koje smanjuju udobnost u vožnji.

#### 2.1.1. Suha spojka s jednom tarnom pločom

Zbog svoje jednostavne građe, niskih troškova proizvodnje i pouzdanosti suha spojka s jednom tarnom pločom najzastupljeniji je tip suhe spojke kod motornih vozila. Osnovni princip rada suhih tarnih spojki jest prijenos okretnog momenta uslijed djelovanja sile trenja na radijusu spojke koja nastaje uslijed djelovanja normalne sile. [Slika 1] prikazuje razne izvedbe suhih spojki s jednom tarnom pločom





1 – Koljenasto vratilo, 2 – zamašnjak spojke, 3 – tarnu ploča, 4 – potisna ploča, 5 – jaram, 6 – tanjurasta opruga, 7 – uključni ležaj – potisni, 8 – uključni ležaj – vlačni, 9 – ulazno vratilo transmisije, 10 – poluga aktuatora, 11 – aktuatorski mehanizam

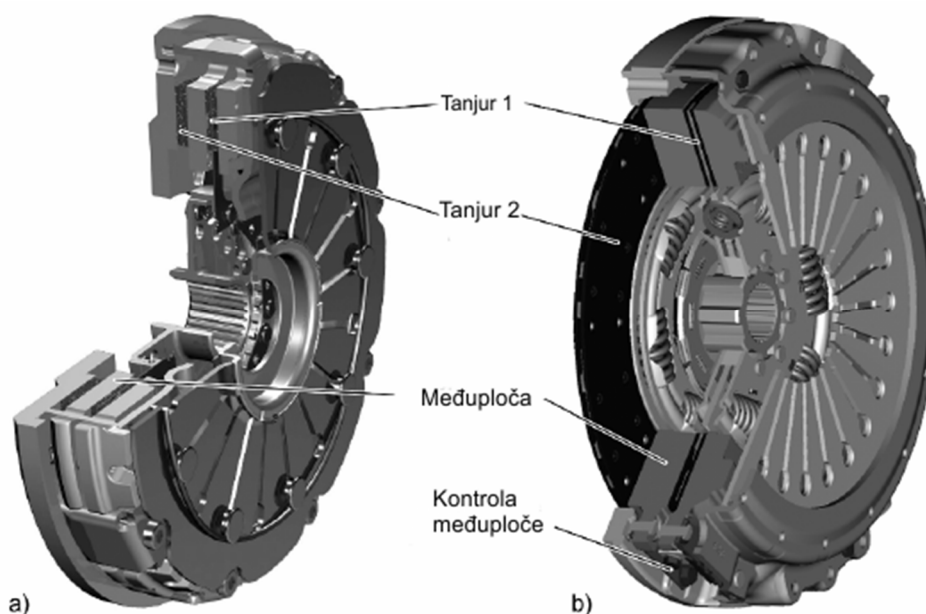
### Slika 1. Shematski prikaz izvedbi suhe spojke s jednom tarnom pločom [1]

Prilikom rada snaga s motora s unutarnjim izgaranjem prenosi se na zamašnjak (2). Tanjurasta opruga (6) oslanja se o jaram (5) te potiskuje tarnu ploču (3) o zamašnjak. Na taj način osigurana je adekvatna normalna sila koja uzrokuje pojavu sile trenja na radijusu tarne ploče (3) što osigurava daljnji tok snage do ulaznog vratila transmisije. Spojka je izvedena tako da tokom cijelog vremena biva prirodno zatvorena. Otvaranje spojke vrši se mehanizmom otpuštanja koju kod konvencionalne MT transmisije pogoni vozač pritiskivanjem papuče spojke. Prilikom otvaranja spojke sila se s pedale spojke mehanizmom otpuštanja prenosi do poluge za otvaranje spojke (10). Ovisno o izvedbi spojke otvaranje se može vršiti potiskivanjem (*push type spojka*) [Slika 1] a) ili povlačenjem (*pull type spojka*) [Slika 1] b). Prilikom otvaranja spojke potiskivanjem tanjurasta opruga biva potisnuta potisnim ležajem (7) te se uslijed sile elastično deformira pri čemu se vanjski rubovi udalje te prestaju potiskivati tarnu ploču (3). Otvaranje spojke povlačenjem vrši se na identičan način samo što se tanjurasta opruga elastično deformira uslijed povlačenja. Sa stajališta aksijalnog opterećenja spojke i deformiranja tanjuraste opruge

povoljniji je povlačni tip spojke, ali je otežano formiranje potisnog ležaja koji mora biti opterećen vlačnom silom kao i montaža takve spojke

### 2.1.2. Suha spojka s dvije tarne ploče

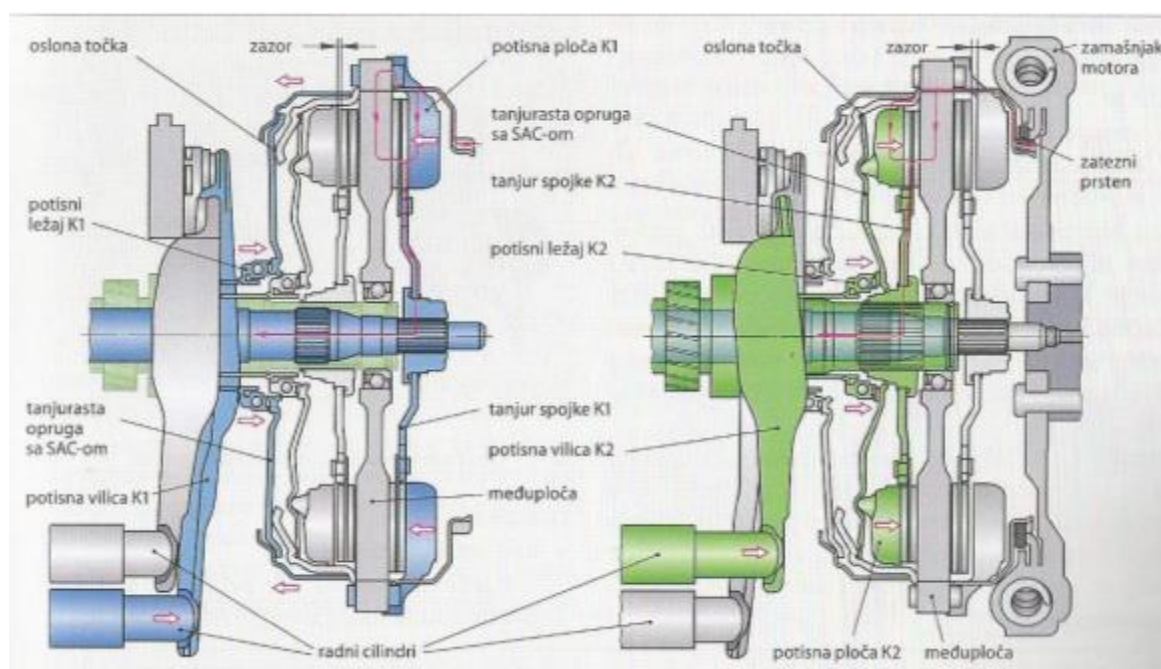
Kod motornih vozila s velikim iznosom momenta motora s unutarnjim izgaranjem kao što je to slučaj kod sportskih i komercijalnih vozila ugrađuju se suhe spojke s dvije tarne ploče. Razlozi konstrukcijskog rješenja s dvije tarne ploče leže u sljedećim problemima. Kako bi se prenio veći okretni moment potrebno je bilo povećati silu opruge, koeficijent trenja, radijus obloga, ili broj tarnih obloga. Povećanje sile opruge nije bilo povoljno zbog povećanja aksijalne sile na ležaj radilice te glomaznijeg mehanizma isključivanja zbog većeg potrebnog prijenosnog odnosa. Značajnije povećanje koeficijenta trenja nije moguće, a veći srednji radijus trenja vodi povećanim dimenzijama spojke. Rješenje problema je suha spojka s dvije tarne ploče koja zbog većeg broja tarnih površina omogućuje prijenos većeg momenta te može podnijeti veće toplinsko opterećenje. Spojke s dvije tarne ploče bliska je građom spojci s jednom tarnom pločom pri čemu princip rada ostaje nepromijenjen što je vidljivo na [Slika 2] gdje su prikazane dvije izvedbe suhe spojke s dvije tarne ploče. [Slika 2] a) pokazuje suhu spojku s dvije tarne ploče za osobni automobil s promjerom tanjura do 228 mm i mogućnosti prijenosa okretnog momenta od 800 Nm. [Slika 2] b) prikazuje suhu spojku s dvije tarne ploče i kontrolom međuploče koja osigurava jednoliku raspodjelu pritiska na oba tanjura te tako omogućuje proporcionalni prijenos momenta s obje tarne ploče.[2], [3]



**Slika 2. Suha automobilska spojka s dvije tarne ploče [2]**

### 2.1.3. Dvostruka suha spojka

Dvostruka suha spojka primjenjuje se u (DCT) transmisijama automobila s okretnim momentom motora do 250 Nm. Građena je od dvije nezavisne spojke koje su na [Slika 3] označene oznakama K1 i K2. Kod takve izvedbe mjenjača tarna ploča spojke K1 spojena je sa punim vratilom mjenjača AW1 dok je tarna ploča K2 spojena na šuplje vrtilo mjenjača AW2. Na vrtilo AW1 spojeni su zupčanci neparnih brzina dok su na vrtilo AW2 spojeni zupčanci parnih stupnjeva prijenosa. Suhe dvostruke spojke izvedene su kao SAC (*Self Adjusting Clutch*) spojke s kompenzacijom trošenja zbog manje sile odvajanja, šireg područja trošenja obloga kao i kraćeg hoda uključivanja/isključivanja. Sam princip prijenosa snage kao i komponente u dvostrukoj spojci slijede koncepciju klasične jednostruke tarne spojke. Međutim, za razliku od jednostrukih tarnih spojki, dvostruke tarne spojke prirodno su otvorene spojke. Razlog tome je sigurnost od zaribavanja (DCT) transmisije prilikom nestanka napajanja. Kad bi nestalo napajanje, a spojke bi bile prirodno zatvorene, obje spojke prenosile bi moment te bi zbog razlike u prijenosnim omjerima između parnih i neparnih brzina došlo do kočenja transmisije uslijed različitih brzina klizanja spojki.

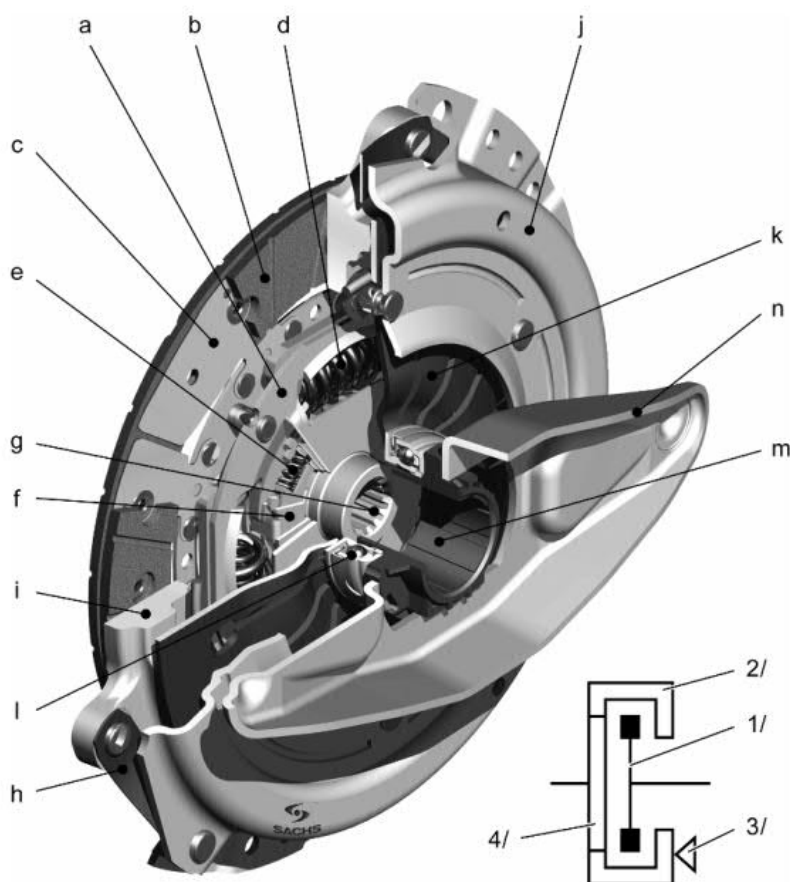


Slika 3. Suha dvostruka spojka s elektrohidrauličkim aktiviranjem [4]

## 2.2. Građa automobilskih suhih spojki

Kako se koncepcija i princip rada ne razlikuju mnogo kod raznih izvedbi suhe spojke, građu suhih tarnih spojki možemo promatrati na primjeru jednostruke tarne suhe spojke koja je prikazana na [Slika 4]. Općenito suhe tarne spojke građene su od četiri glavne komponente:

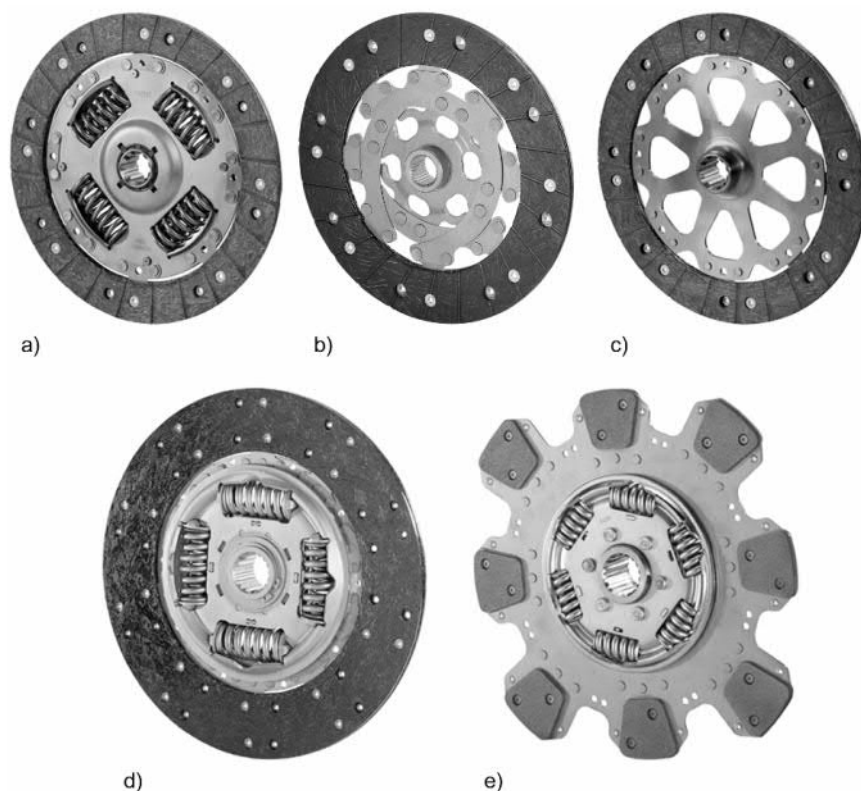
- 1) Tarna ploča spojke: **a)** nosač obloga; **b)** tarna obloga; **c)** elastična podloga obloge; **d)** opruga za prigušivanje torzijskih vibracija (u vožnji); **e)** opruga za prigušivanje torzijskih vibracija (u praznom hodu); **f)** tanjurasta opruga; **g)** glavčina;
- 2) Sklop potisne ploče: **h)** tangencijalna lisnata opruga; **i)** potisna ploča; **j)** kućište potisne ploče; **k)** tanjurasta opruga;
- 3) Mehanizam isključivanja/uključivanja: **l)** potisni ležaj; **m)** klizni rukavac; **n)** potisna vilica;
- 4) Zamašnjak



**Slika 4. Jednostruka suha automobilska spojka [3]**

### 2.2.1. Tarna ploča spojke

Uloga tarne ploče spojke je prijenos okretnog momenta sa zamašnjaka i potisne ploče na vratilo mjenjača. Glavne komponente tarne ploče spojke su prema [Slika 4]: **a)** nosač obloga; **b)** tarna obloga; **c)** elastična podloga obloge; **d)** opruga za prigušivanje torzijskih vibracija (u vožnji); **e)** opruga za prigušivanje torzijskih vibracija (u praznom hodu); **f)** tarna ploča; **g)** glavčina. [2] Postoje različite izvedbe tanjura spojke koje su prikazane na [Slika 5].



**Slika 5. Tanjuri spojke [3]**

- a) Tarna ploča spojke s oprugom za prigušivanje torzijskih vibracija za osobne automobile
- b) Fleksibilna tarna ploča spojke spojke za prigušenje vibracija za osobne automobile
- c) Kruta tarna ploča spojke kod osobnih automobila
- d) Tarna ploča s oprugom za prigušivanje torzijskih vibracija za komercijalnih vozila
- e) Tarna ploča spojke s keramičkim oblogama za komercijalna vozila [3]

**Tarne obloge** dio su tarne ploče spojke pri čemu se one za tarnu ploču spojke mogu vezati obostrano zakovicama ili ljepilom. Većina tarnih obloga u suhim spojkama izrađena je s nizom radijalnih kanala koji omogućuju izbacivanje ostataka uslijed trošenja, pospješuju hlađenje tarnih obloga te sprječavaju adheziju tarnih obloga za potisnu ploču i zamašnjak. Najvažniji

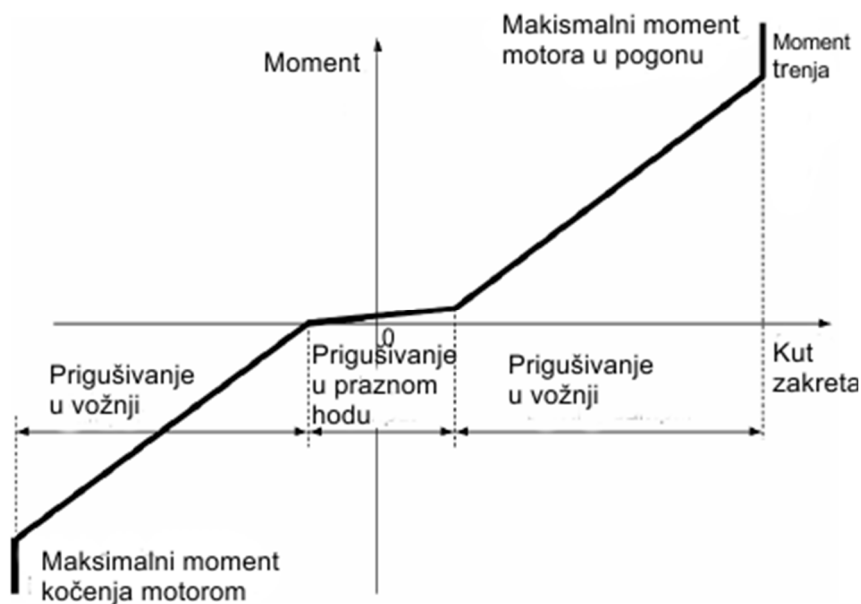
kriterij kod odabira tarne obloge su: koeficijent trenja, brzina trošenja obloge, distorzija uslijed termalnog opterećenja te specifična težina obloga. Danas postoje tri najčešće primijenjena tipa tarnih obloga kod suhih automobilskih spojki, a to su prema [3]:

- Organske tarne obloge: Iz razloga komfora ove obloge najčešće se primjenjuju kod osobnih automobila. Sastoje se primarno od vlakana (stakla, aramidnih ili celuloznih vlakana u kombinaciji s mjedenom ili bakrenom žicom) koja su umetnuta u tarnu smjesu koja se sastoji od ugljika, grafita i kaolina.
- Metalne ( keramičke) sinter obloge: To su materijali koji su pogodni za velika opterećenja specijalno za rovokopače i traktore. Najčešće su trapezoidnog oblika kao što je prikazano na [Slika 5] e) . Najčešće su direktno sinterirane na tanjuru spojke ili pričvršćeni zakovicama za tarnu ploču spojke. Veliki nedostatak je pojava trešenja te se iz tog razloga ne koriste kod automobila.
- Karbonske obloge: One su podgrupa organskih obloga. Karbonska vlakna umeću se u obloge kako bi se povećala toplinska otpornost obloga, ali i povećala krutost obloge.

**Usporavanje brzine stvaranja pritiska** značajno je za glatko uključivanje bez trešnje. Prilikom djelovanja aksijalne sile potisna ploča prenosi pritisak na obloge koje su pričvršćene na elastičnoj podlozi. Elastičnost podloge obloga usporava brzinu prirasta pritiska te na taj način doprinosi glatkom procesu uspostavljanja toka momenta.

**Prigušivanje torzijskih vibracija** potrebno je kako ne bi došlo do neželjenih oštećenja na transmisiji te kako bi se povećao komfor prilikom vožnje automobila. U tarnoj ploči spojke nalaze se četiri ili više opruga koje su smještene po obodu tanjura. Najčešće su dva seta po četiri opruge od kojih jedan set većih služi za prigušivanje torzijskih vibracija u vožnji, a drugi set manjih služi za prigušivanje u praznom hodu. Torzijske vibracije nastaju uslijed promjene opterećenja na motoru npr. prelazak u kočenje motorom što je osobito izraženo kod Diesel motora ili naglih ubrzanja uz strelovite promjene stupnjeva prijenosa te rotacijske nepravilnosti uzrokovane paljenjem motora s unutarnjim izgaranjem. Na [Slika 6] prikazan je dijagram

sustava prigušivanja torzijskih vibracija sa zadržaćima koji sprječavaju maksimalno stiskanje spiralnih opruga prilikom djelovanja maksimalnog momenta.

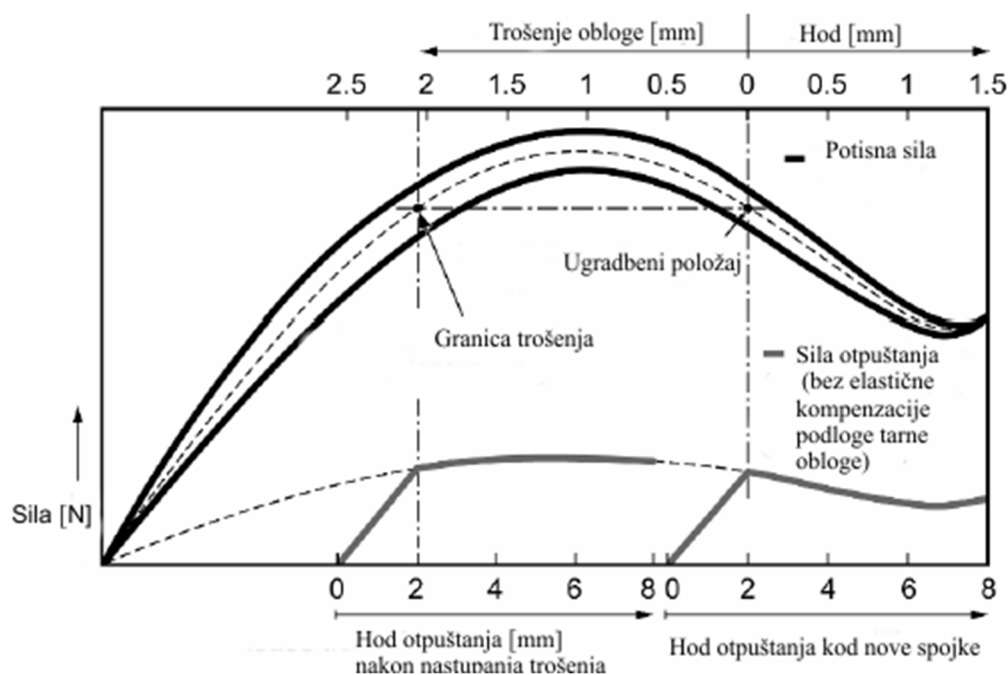


Slika 6. Krivulja prigušivanja torzijskih vibracija [3]

### 2.2.2. Sklop potisne ploče

Sklop potisne ploče ostvaruje normalnu silu na tarnu ploču spojke te omogućuje aktivaciju i deaktivaciju spojke, a sastoji se od : tangencijalne lisnate opruge **h**; potisne ploče **i**; kućišta potisne ploče **j** i tanjuraste opruge **k** [Slika 4].

**Tanjurasta opruga** ima ulogu stvaranja aksijalne sile koja se prenosi preko potisne ploče na tanjur spojke pri čemu normalna sila na srednjem radijusu tarnih obloga transformira u obodnu silu trenja. Karakteristika tanjuraste opruge od velikog je značaja pri konstrukciji automobilske spojke jer odabir tanjuraste opruge direktno utječe na silu potrebnu za potiskivanje pedale mehanizma za otvaranje. Karakteristika tanjuraste opruge prikazana je na Slika 5. Iz karakteristike je vidljivo kako potisna sila prvo progresivno raste da bi na drugom dijelu regresivno padala. Na graničnom istrošenju tarnih obloga normalna sila gotovo je jednaka kao i kod nepotrošenih obloga što u praksi znači da trošenjem obloga do granične vrijednosti neće doći do proklizavanja spojke zbog pada potisne sile. Porastom trošenja iznad granične vrijednosti potisna sila drastično pada, te na taj način vozač može osjetiti proklizavanje spojke te zamijeniti spojku. [3],[2]



Slika 7. Značajka spojke [3]

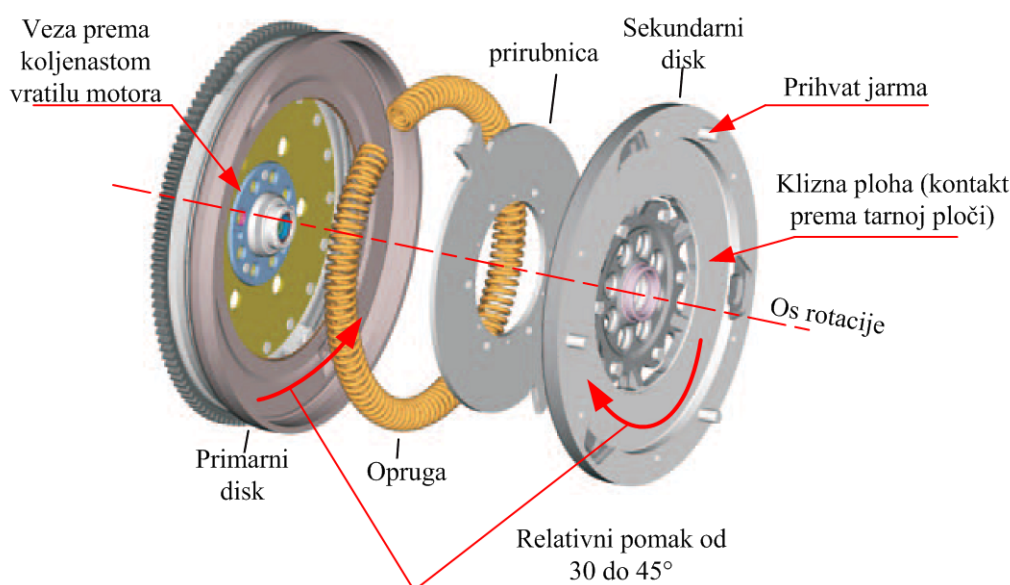
**Potisna ploča** ima ulogu prenošenja potisne sile na tarnu oblogu tanjura spojke te je u direktnom kontaktu s tarnom oblogom tanjura spojke. Iz tog razloga zbog trenja klizanja dolazi do zagrijavanja obloge tanjura spojke te potisne ploče. Povećanjem mase dobiva se veći spremnik topline, međutim, zbog rasterećenja povratne opruge potrebno je smanjiti masu što znači da je potrebno pronaći kompromis. Visoko toplinski opterećene ploče najčešće se izvode s orebrenjem što povećava površinu i pospješuje hlađenje. [3]

### 2.2.3. Zamašnjak

Uloga zamašnjaka je pohrana i prijenos kinetičke energije koju daje motor s unutarnjim izgaranjem. Primarno se koristi kako bi se inercijom izgladile privremene devijacije u opterećenju i snazi koje su posljedica taktnog principa rada motora s unutarnjim izgaranjem. Unutarnji dio zamašnjaka u sklopu spojke kad je spojka zatvorena u dodiru je s oblogom tanjura spojke tj. preuzima ulogu sekundarne tarne površine. U današnje vrijeme se sve više primjenjuje dvomaseni zamašnjak DMF (*Dual Mass Flywheel*) prikazan na [Slika 8]. Potreba za primjenom dvomasenog zamašnjaka slijedila je trend razvoja motora s prednabijanjem koji razvijaju veliki okretni moment pri niskom i srednjem broju okretaja što izaziva izražene



vibracije. Prednost dvomasenog zamašnjaka je prigušenje torzijskih vibracija na svim brzinama vrtnje što povećava udobnost vožnje. Negativne karakteristike uključuju smanjenje ubrzanja vozila zbog povećanja mase, povećani troškovi proizvodnje te potencijalni problemi s prostorom uslijed povećane aksijalne dimenzija zamašnjaka. Dvomaseni zamašnjak građen je od primarnog diska koji je neposredno vezan za koljenasto vratilo te od sekundarnog diska neposredno vezan za jaram spojke i potisnu ploču. Međusobna veza ove dvije polovice zamašnjaka, a koja prenosi i okretni moment sastoji se od cirkularno postavljenih opruga i tarnog elementa u formi prirubnice. Tarni element ima izvrsna svojstva prigušenja torzijskih vibracija te zajedno s oprugom predstavlja učinkoviti amortizer.

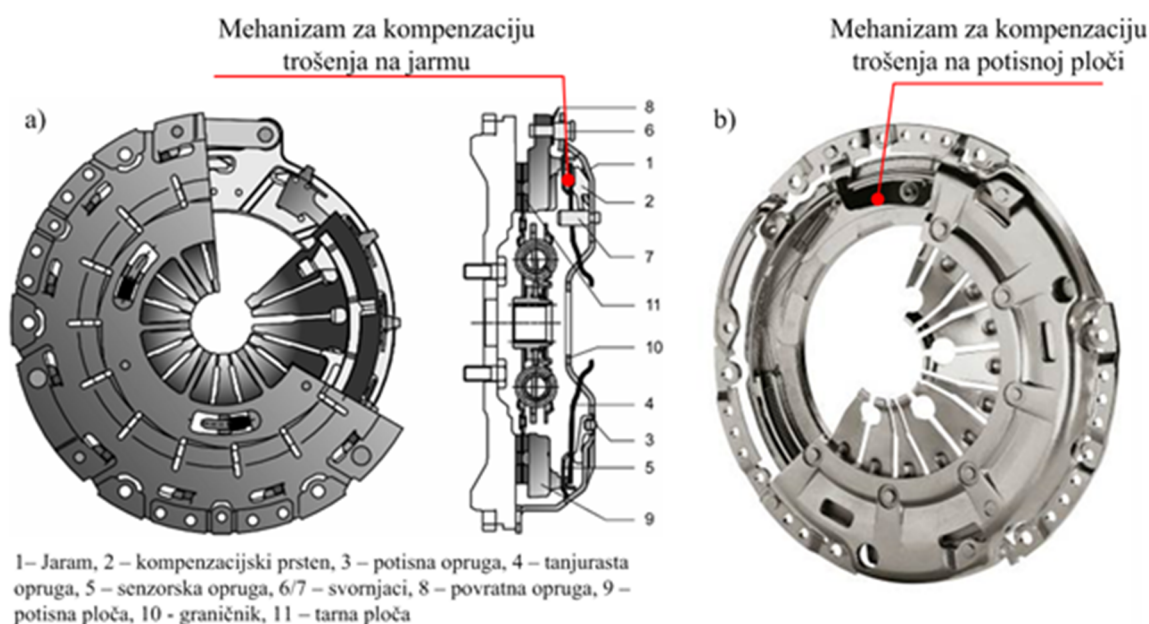


**Slika 8. Dvomaseni zamašnjak (DMF) [3]**

#### **2.2.4. Kompenzacija trošenja**

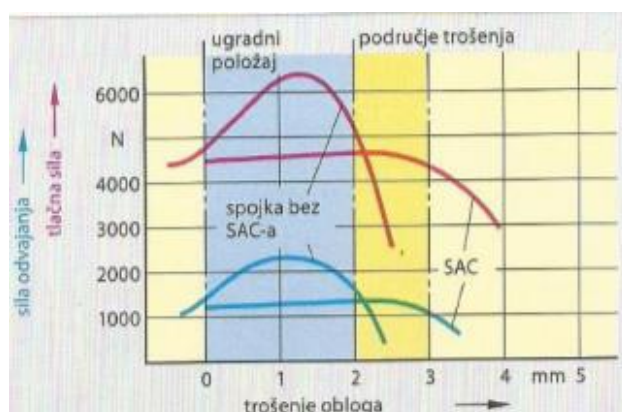
Tokom eksploatacije spojke, tarne plohe na tarnoj ploči troše se pri čemu se smanjuje debljina tarne ploče. Kod jednostrukih spojki koje su prirodno zatvorene spojke prilikom trošenja dolazi do promjene pozicije potisne ploče prema naprijed dok kod dvostrukih prirodno otvorenih spojki dolazi do povećanja zračnosti. Za oba tipa spojki hod potreban za uključivanje se povećava. Kod manualnih transmisija MT kompenzaciju hoda na jednostrukoj spojci kompenzira vozač na pedali spojke. Prilikom zatvaranja istrošene jednostruke spojke pokretanje vozila odvija se tek kod gotovo otpuštene pedale spojke. Kod DCT transmisija kompenzacija trošenja dvostrukih spojki ograničena je hodom aktuatora.

Hod aktuatora najčešće se ne može povećati zbog nedovoljnog prostora. Iz tog razloga za potrebe takvih transmisija razvijene su spojke sa sustavom kompenzacije trošenja SAC (*Self Adjusting Clutch*) prikazane na [Slika 9]. Kompenzaciju trošenja izvršava senzorska opruga (5) koja potiskuje oslonac tanjuraste opruge od jarma (1) prema potisnoj ploči.



**Slika 9. Spojka s mehanizmom za kompenzaciju trošenja (SAC spojka) [5]**

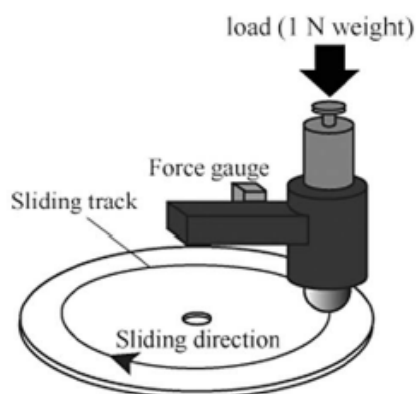
Takva izvedba omogućava kompenzaciju zračnosti nastale trošenjem obloga što izravno utječe na karakteristiku tlačne sile i sile odvajanja. Kao što je vidljivo na [Slika 10] sila tlačenja zbog kompenzacije trošenja ostaje nepromijenjena u širem području trošenja obloga što omogućava duži radni vijek. Također je vidljivo kako su sile odvajanja kod SAC manje nego što je to slučaj kod klasičnih spojki. Osim kod upravljanja spojki nožnim putem SAC spojke primjenjuju se zbog svojih karakteristika sve više kod sustava s automatskim upravljanjem spojki.[3],[4]



**Slika 10. Značajke klasične i SAC spojke [4]**

### 3. PREGLED ISPITNOG POSTAVA PIN ON DISK METODE

Uređaj za ispitivanje karakteristika trenja pin on disk metodom konstruiran je na FSB-u te se koristi za ispitivanja karakteristika trenja i trošenja tarnih materijala. Navedeni uređaj potrebno je unaprijediti, a unapređenje uređaja provest će se na način da se pokušaju otkloniti nedostaci, a istovremeno zadrže dobre karakteristike postojećeg uređaja. Pin on disk metoda najčešće se koristi za ispitivanje faktora trenja tarnih materijala kočnica i spojki. Kod navedene metode prikazane na [Slika 11] pin klizi po rotirajućem disku pri čemu se pin ili disk izrađuju od ispitivanog materijala. Kako tarna obloga u spojci klizi po čelu zamašnjaka, pin se izrađuje od čeličnog materijala, a disk se izrađuje od tarnog materijala spojke istim proizvodnim postupkom kao i tarna obloga spojke. Na taj način osigurava se jednaka kvaliteta materijala koji se ispituje s onim koji se koristi u spojci. Time se anuliraju moguća veća odstupanja od realnog slučaja jer se istim načinom izrade uzimaju u obzir nepravilnosti prilikom izrade. Također je moguća i obrnuta kombinacija kod koje se pin izrađuje od tarnog materijala spojke, a disk od čelika. [6]



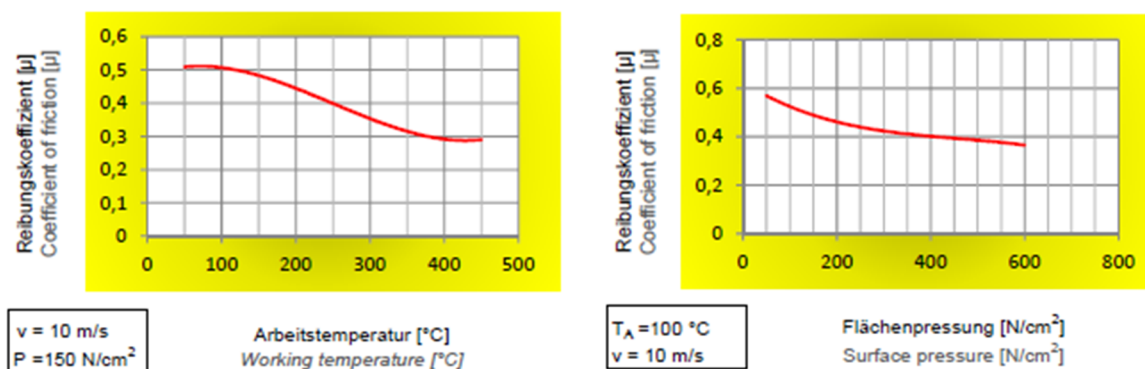
Slika 11. Skica Pin on disk metode [9]

Faktor trenja određuje se iz poznatog prema [8]

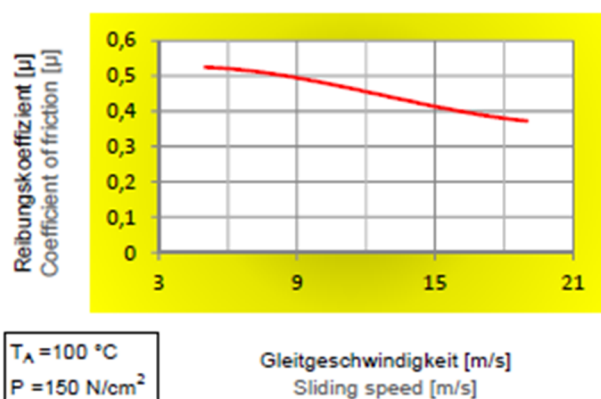
$$\mu = \frac{F_t}{F_N} . \quad (3.1)$$

Iznos faktora trenja dobiva se sada iz vrijednosti tangencijalne sile  $F_t$  i normalne sile  $F_N$  koje se dobivaju iz senzora postavljenog na nosaču pina. Mjerenje faktora trenja vrši se pri različitoj temperaturi, površinskom pritisku i brzini klizanja. Većina proizvođača daje vrijednosti faktora

trenja ovisno o temperaturi, površinskom pritisku i brzini klizanja. Primjer vrijednosti za jednu vrstu tarnog materijala tvrtke Luk prikazan je na [Slika 12] i [Slika 13].

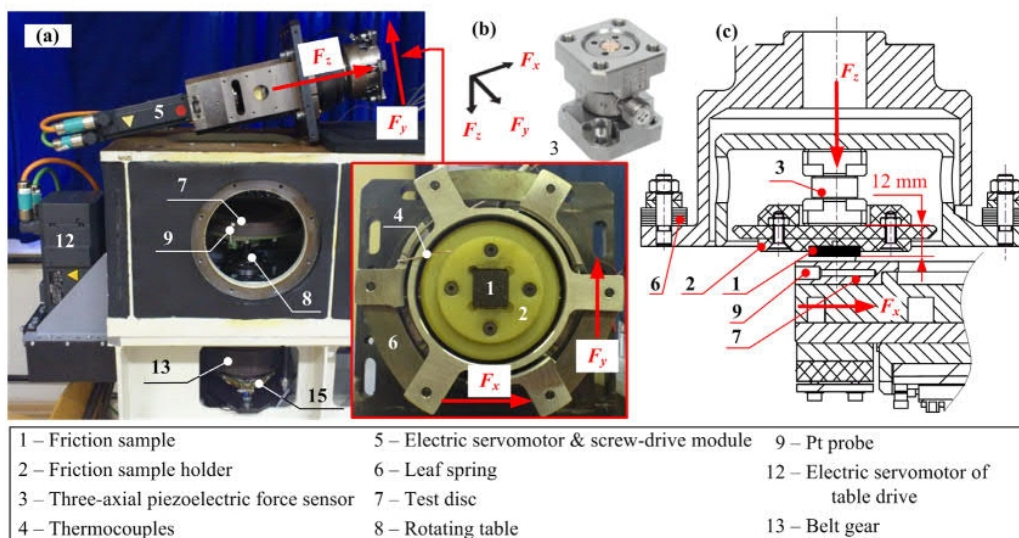


Slika 12: Primjeri rezultata mjerenja [12]

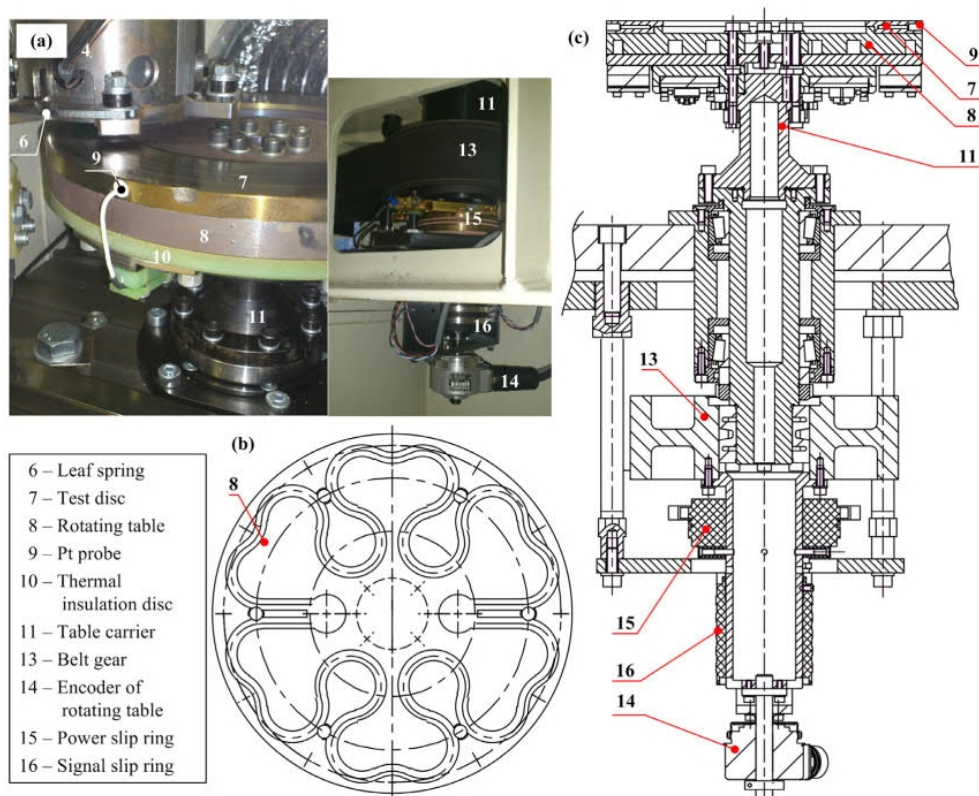


Slika 13. Primjer rezultata mjerenja [12]

Uređaj prikazan na [Slika 14], [Slika 15] razvijen je za potrebe mjerenja faktora trenja te trošenja tarnih materijala na FSB u Zagreb pri čemu su normalna sila, brzina klizanja te temperature glavni parametri tijekom mjerenja.



Slika 14: Izvedba pin on disk tribometra [11]



Slika 15. Izvedba nosača i pina tribometra [11]

Uređaj mjeri iznos tangencijalne i normalne sile kompaktnim troosnim piezoelektričnim senzorom (3) koji je ugrađen u nosač pina [Slika 14]. Prednost ovakve leži u tome što je senzor jedina mehanička veza s uzorkom, što znači da senzor direktno mjeri ukupne sile koje djeluju



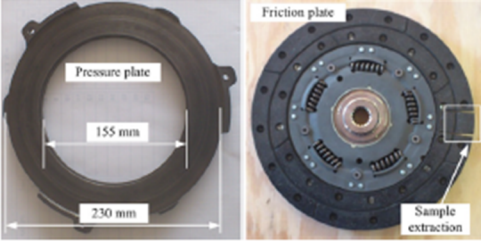
na uzorke. Navodi se kako se greška prilikom mjerenja smanjuje približavanjem senzora ispitivanom uzorku. Međutim, približavanjem senzora također raste pogreška uslijed zagrijavanja senzora. Navodi se kako je potrebno toplinski što je bolje izolirati senzor, a idealna kombinacija teško se postiže. Temperatura senzora kao i uzorka pina mjeri se senzorima temperature. Prilikom mjerenja dolazi do zagrijavanja senzora što uzrokuje netočna očitavanja normalne sile. Kako bi se to izbjeglo prilikom dužih ispitivanja automatski sustav udaljava sklop pina od diska svakih 60 sekundi pri čemu se vrši resetiranje piezoelektričnog senzora. Prilikom mjerenja također dolazi do oscilacija u normalnoj sili uzrokovanih neravninama tarne plohe. Kako bi se što točnije odredio faktor trenja oscilacije su ublažene sustavom tanjurastih opruga (6) na sklopu pina. Faktor trenja izračunava se prema izrazu (1.2) gdje se prilikom mjerenja također uzima greška poravnanja osi senzora  $F_y$  s djelovanjem tangencijalne sile. U tom slučaju izraz (1.1) glasi

$$\mu = \frac{F_t}{F_N} = \frac{\sqrt{F_x^2 + F_y^2}}{F_z}. \quad (3.2)$$

Uzorak pina formira se iz mekšeg materijala ispitivanog para što također pridonosi prigušenju oscilacija uzrokovanih neravninama na površini. Tako se za uzorak uzima materijal tarne ploče kvadratnog oblika dimenzija 20x20x4mm. Navodi se kako je kvadratni oblik pina uzet zbog toga što se kvadratni poprečni presjek kompozitnog materijala lakše reže u odnosu na kružni. Za razliku od komercijalno dostupnih, pin on disk tribometra prikazani uređaj znatno je veći što omogućava smještaj diska izrezanog iz prave potisne ploče te korištenje značajno većeg uzorka materijala tarne ploče. Značajno veći promjer uzorka diska povećava mogućnost greške prilikom mjerenja zbog deformacije diska djelovanjem normalne sile na većem radijusu. Međutim, veličina diska znači da će se radijus djelovanja sile trenja prilikom ispitivanja  $r$  moći značajno približiti ekvivalentnom radijusu spojke  $r_{eq}$  što znači da će razlike u brzini klizanja na unutarnjem i vanjskom dijelu pina biti značajno manje nego što bi to bio slučaj kod stroja s malim radijusom diska. Isto tako veća veličina stroja omogućava pozicioniranje pina veće površine. Veća površina pina značajna je kako bi se prilikom ispitivanja mogao ostvariti nominalni površinski pritisak istog iznosa kao u spojci, a da se pri tom normalna sila zadrži u području veličina koje su mjerljive piezoelektričnim senzorom što je jasno vidljivo iz izraza (1.3)

$$p = \frac{F_{Nsp}}{A_{sp}} = \frac{F_{Ni}}{A_i} . \quad (3.3)$$

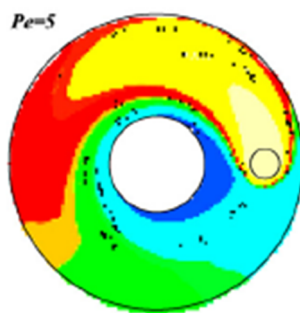
Vrijednosti parametara spojke i tribometra značajnih za ispitivanje i konstrukciju tribometra prikazani su na [Slika 16].



CLUTCH		TRIBOMETER	
Clutch nominal torque	$M_d = 220 \text{ Nm}$	Tangential force	$F_t = 26 \text{ N}$
Expected mean coefficient of friction (COF)	$\mu = 0.35$	Expected mean coefficient of friction (COF)	$\mu = 0.35$
Clutch nominal normal force	$F_d = 3250 \text{ N}$	Nominal normal force	$F_n = 73 \text{ N}$
Clutch equivalent radius	$r_{eq} = 97 \text{ mm}$	Sample sliding radius	$r = 90 \text{ mm}$
Friction lining thickness	$x_f = 4 \text{ mm}$	Friction lining thickness	$x_f = 4 \text{ mm}$
Friction plate surface	$A_d = 17,637 \text{ mm}^2$	Sample contact surface	$A = 400 \text{ mm}^2$
Maximum operating temperature	$T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$	Maximum operating temperature	$T = 250 \text{ }^\circ\text{C}$
Typical slip speed [28]	$\omega_d = 800 \text{ rpm}$	Maximum slip speed (in the presented study)	$\omega = 700 \text{ rpm}$

**Slika 16. Parametri spojke i tribometra [11]**

Ispitni uzorak (disk) (7) izrezan iz potisne ploče pričvršćuje se za rotacijski stol (8) prikazan na Slika 28. Rotacijski stol pogoni se električnim servomotorom preko zupčastog remena pri čemu je ostavljena mogućnost promjene zupčanika remena (13) kako bi se mogli ostvariti razni prijenosni omjeri. Enkoder (14) na vratilu stola mjeri okretaje te na taj način daje povratne informacije o brzini diska te poziciji koje su važne za održavanje stalnog momenta servomotora. Rotacijski stol na kojem se nalazi ispitni uzorak (disk) također sadrži električni grijač prikazan na [Slika28] koji omogućuje ostvarivanje ispitne temperature. Zadana temperatura ispitivanja održava se sustavom kontrole temperature koji prima informacije od senzora temperature ugrađenog u stol. Sustav omogućuje postizanje ispitnih temperatura do  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  u periodu od 20 min pri čemu se varijacije temperature zadržavaju u rasponu  $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$  od nazivne temperature te sprječava zagrijavanje tarnog materijala spojke iznad dopuštenih vrijednosti. Zagrijavanje materijala na temperature iznad dopuštenih uzrokuje trajnu deformaciju ispitivanog uzorka te time onemogućava daljnje mjerenje. Električni grijači također imaju dodatnu ulogu sprječavanja pojave neravnomjernog zagrijavanja diska [Slika 17] koja je karakteristična kada pin on disk tribometar ne bi imao ugrađen električni grijač.



**Slika 17. Neravnomjerno zagrijavanje diska [10]**

Neravnomjerno zagrijavanje posljedica je male kontaktne površine smještene na jednoj strani rotirajućeg diska. Prilikom rotacije uslijed trenja dolazi do zagrijavanja tijela diska u blizini kontakta. Međutim, daljnjom rotacijom dio diska koji je prethodno ostvario kontakt hladi se do ponovnog ostvarivanja kontakta što uzrokuje neravnomjerno zagrijavanje diska. Između rotacijskog stola i vratila nalazi se toplinska izolacija kako bi se smanjio toplinski tok na pogonske dijelove te na taj način zagrijavanje elemenata pogona. Sustav hlađenja (17) za ispitnu komoru tribometra na [Slika 14] omogućuje provođenje ispitivanja ispod sobne temperature te odvođenje topline sa senzora sile nastalih uslijed visokih temperatura diska.

Sustav klimatizacije u komori zasebni je sustav tribometra koji se po potrebi može upaliti ili ugasiti, a prilikom rada omogućuje ostvarivanje konstantne temperature unutar komore. Izmjenjivač topline navedenog sustava opremljen je dodatnim grijačem koji odleđuje kondenziranu vlagu. Cijela komora izolirana je kako bi se održavanje temperature provodilo na efikasniji način. Dodatna komora otvorila je prostor za primjenu ovog tribometra i kod drugih vrsta ispitivanja koja se vrše na temperaturama nižima od sobne temperature. Detaljnija objašnjenja rada tribometra mogu se pronaći u [11].

Glavni nedostatak metode pin on disk jest neravnomjerna raspodjela tlaka po površini diska. Prilikom kontakta pina i diska, pin uvijek ima određeni napadni kut s obzirom na disk te zbog toga dolazi do naglašene neravnomjerne raspodjela tlaka po površini. Neravnomjernost raspodjele tlaka pokazala je manji utjecaj na rezultate kad je pin izrađen od tarnog materijala spojke te se iz tog razloga prilikom ispitivanja najčešće primjenjuje navedena kombinacija. [6] Kao što je već spomenuto, površinski pritisak pina na disk neravnomjerno je raspodijeljen po površini te je mnogo veći nego u realnom slučaju gdje cijela tarna površina spojke naliježe na zamašnjak. Kako bi se izbjegla sumnja u reprezentativnost rezultata zbog navedenih



nedostataka uređaja, bit će koncipiran i konstruiran uređaj koji omogućuje identifikaciju karakteristika trenja mjerenjem na cijelo tarnoj ploči suhe spojke. Pri čemu su reaktivne komponente izrezane iz zamašnjaka i/ili potisne ploče te se kontakt između reaktivnih komponenta i tarne ploče ostvaruje cijelom njihovom površinom. U koncipiranju novog uređaja preuzet će se dobre karakteristike postojećeg sustava: servopogoni, digitalni senzori te električni grijač.

## 4. PREGLED POSTOJEĆIH RASPOLOŽIVIH PODSUSTAVA

Kako bismo prilikom faze koncipiranja lakše odredili moguće izvedbe koncepata potrebno je izvršiti pregled raspoloživih podsustava.

### 4.1. Pregled izvedbi senzora sile i momenta pogodnih za konstrukciju tribometra

Prilikom ispitivanja, ovisno o koncepciji uređaja za ispitivanje, potrebno je mjeriti iznos normalne sile  $F_N$  i tangencijalne sile  $F_t$  ili momenta torzije  $M_t$  kako bismo mogli izračunati faktor trenja klizanja. Iz traženih parametara najmanjeg unutarnjeg/najmanjeg vanjskog promjera tarne plohe: 150/300 mm, najvećeg okretnog momenta spojke 400 Nm te poznatog raspona faktora trenja tarnih ploha, potrebno je izračunati okvirni iznos normalne sile  $F_N$ . Prema dobivenoj okvirnoj vrijednosti normalne sile  $F_N$  vršiti ćemo adekvatan odabir senzora sile ili momenta. Okvirni iznos normalne sile dobivamo uvrštavanjem vrijednosti dobivenih iz projektnih parametara u izraz (1.4). Izraz za normalnu silu prema [18] glasi

$$F_N = \frac{T_s}{\mu \cdot r_m \cdot z}, \quad (4.1)$$

gdje je  $r_m$  srednji radijus,  $T_s$  okretni moment koji prenosi spojka,  $z$  broj tarnih ploha,  $\mu$  faktor trenja klizanja. Izraz za srednji radijus glasi

$$r_m = \frac{2}{3} \left( \frac{r_v^3 - r_u^3}{r_v^2 - r_u^2} \right), \quad (4.2)$$

gdje je  $r_v$  vanjski radijus, a  $r_u$  unutarnji radijus tarne ploče spojke. Kako su njihove vrijednosti zadane zadatkom i iznose;  $r_u = 75$  mm te  $r_v = 150$  mm, njihovim uvrštavanjem u izraz (1.5) dobivamo

$$r_m = \frac{2}{3} \left( \frac{150^3 - 75^3}{150^2 - 75^2} \right) = 116,67 \text{ mm}. \quad (4.3)$$

Ukoliko će ispitni uređaj biti izveden s dvije tarne plohe  $z = 2$  uvrštavanjem vrijednosti sada dobivamo

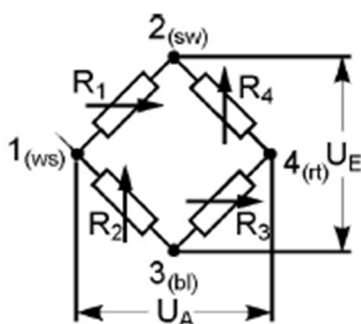
$$F_N = \frac{400 \text{ Nm}}{0.2 \cdot 0.11667 \text{ m} \cdot 2} \approx 8572 \text{ N}. \quad (4.4)$$

Ukoliko će ispitni uređaj biti izveden s jednom tarnom površinom, spojka prenosi pola nominalnog momenta samo preko jedne tarne površine iz čega slijedi

$$F_N = \frac{200 \text{ Nm}}{0.2 \cdot 0.11667 \text{ m}} = 8572 \text{ N} . \quad (4.5)$$

Sile koje djeluju na senzor ovise o broju senzora te njihovom rasporedu, a izračunati vrijednost normalne sile poslužit će kao vodilja za pregled potencijalno primjenjivih senzora.

Senzori za mjerenje sile i momenta s obzirom na princip rada mogu biti piezoelektrični i tenzometarski senzori. Prilikom opterećenja tenzometarskog senzora uslijed opterećenja dolazi do elastične deformacije tijela senzora na kojem se nalaze tenzometarske trake. Kako je tenzometarska traka zalijepljena na tijelo senzora koje se deformiralo, deformirala se i tenzometarska traka tj. nastala deformacija uzrokovala je skraćenje ili produljenje tenzometarske trake. Skraćenje ili produljenje vodiča unutar tenzometarske trake povećava ili smanjuje otpor, a kako su tenzometarske trake spojene u Wheatstoneov most [Slika 18] deformacija se očituje kao omjer izlaznog napona  $U_A$  i ulaznog napona  $U_E$  što je dano jednadžbom (1.9) navedenoj u [16] str. 2. Jednadžba (1.9) glasi



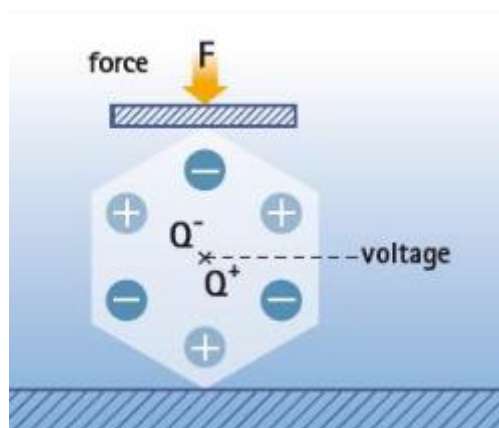
Slika 18. Wheatstoneov mjerni most [16]

$$\frac{U_A}{U_E} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (4.6)$$

gdje je  $k$  faktor tenzometarske trake dobiven od proizvođača, a  $\varepsilon_{1..4}$  deformacije na mjestima tenzometarskih traka. Sila koja uzrokuje deformaciju dobiva se iz jednadžbe Hookeova zakona

$$F = E \cdot A \cdot \varepsilon \quad (4.7)$$

gdje je  $E$  modul elastičnosti materijala tijela senzora,  $A$  poprečni presjek tijela senzora,  $\varepsilon$  elastična deformacija tijela senzora. Za razliku od tenzometarskih senzora, piezoelektrični senzori rade na principu piezoelektričnog efekta [Slika 19] pri čemu u senzor ugrađeni kristal uslijed deformacije generira napon koji je proporcionalan sili.



**Slika 19. Princip piezoelektričnog efekta [15]**

Osjetljivost piezoelektričnog senzora ne ovisi o veličini niti volumenu kvarcnog kristala, nego o vrsti materijala i njegovoj geometriji. Napon generiran kvarcnim kristalom piezoelektričnog senzora dan je jednadžbom

$$Q = q_{11} \cdot n \cdot F \quad (4.8)$$

gdje je  $q_{11}$  konstanta materijala,  $n$  broj serijski povezanih kvarcnih elemenata, a  $F$  sila koja opterećuje senzor. Tenzometarski senzori pružaju bolju stabilnost kod dugotrajnijih statičkih mjerenja te pružaju bolju kompenzaciju uslijed utjecaja temperature. Dugotrajni statički slučajevi nisu mjerljivi piezoelektričnim senzorima. U [23] se navodi kako prilikom mjerenja statičkog slučaja piezoelektričnim senzorom dolazi do odstupanja u mjerenju koje iznosi 1N/min što znači da takva mjerenja moraju biti vremenski ograničena ukoliko se želi zadržati određena točnost mjerenja. Tako npr. piezoelektrični senzor mjerne osjetljivosti 215 000pC za raspon mjerenja do 50 kN za izlazni signal -4.3pC/N ostvaruje odstupanje manje od 0.05% za maksimalno vrijeme mjerenja od 25 min. Piezoelektrični senzori pokazuju se adekvatnijima za dinamičke slučajeve opterećenja. Veliku prednost, također, ostvaruju svojim kompaktnim

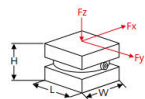


dizajnom pri čemu su i do trideset puta manji od tenzometarskih senzora, a pri tome omogućuju mjerenja istog raspona sile.

Kako je postupak mjerenja faktora trenja kvazistatički slučaj odabrat će se piezoelektrični senzori čija konstrukcija ima visoku vlastitu frekvenciju kako bi se smanjio utjecaj na rezultate uzrokovan prisilnim vibracijama u sustavu. Također, potrebno je obratiti pažnju na kompenzaciju smetnji u mjernom signalu uzrokovanog zagrijavanjem. Odabir senzora, također, ovisi o koncepciji uređaja te je potrebno razmotriti sve opcije koje zadovoljavaju utvrđene parametre. Tako se kao moguća rješenja nameću:

- višeksijalni piezoelektrični senzori sile i momenta
- višeksijalni piezoelektrični senzori sile
- piezoelektrični senzori sile
- piezoelektrični senzori momenta torzije




S obzirom na okvirni iznos normalne sile tokom ispitivanja koji je dobiven u (4.4) zaokruženi su na [Slika 20] i [Slika 21] kompaktni višeksijalni piezoelektrični senzori sile koji bi zadovoljavali navedeni kriterij, a izvedeni su tako da ostvaruju vrlo visoke vlastite frekvencije. Iz navedenih razloga vrlo su pogodni za navedenu primjenu.

### 3-Component Quartz Force Links

Technical Data	Type	9317C	9327C	
				
Measuring ranges	Fx, Fy Fz	kN kN	-0,5 ... 0,5 -3 ... 3	-1 ... 1 -8 ... 8
Calibrated meas. ranges	Fx, Fy Fz	kN kN	0 ... 0,05 / 0 ... 0,5 0 ... 0,3 / 0 ... 3	0 ... 0,1 / 0 ... 1 0 ... 0,8 / 0 ... 8
Sensitivity	Fx, Fy Fz	pC/N pC/N	≈-25 ≈-11	≈-7,8 ≈-3,8
Dimensions	LxWxH	mm	25x25x30	42x42x42
Rigidity	$c_{x/y}^{1)}$ $c_{x/z}$	kN/μm kN/μm	0,19 0,9	0,39 1,4
Natural frequency	$f_n(x)$ , $f_n(y)$ $f_n(z)$	kHz kHz	≈5,6 ≈20	≈3,2 ≈12
Weight	g	85	380	
Operating temperature range	°C	-40 ... 120	-40 ... 120	
Connector		V3 neg.	V3 neg.	
Deg. of protection to IEC/EN 60529 screwed with cable (e.g. 1698AA/AB) welded with cable (e.g. 1698ACsp)	IP65 IP67	<ul style="list-style-type: none"><li>•</li><li>•</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•</li><li>•</li></ul>	
With basic insulation		<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	
Preloaded		<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	
Ready for measurement		<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>•</li></ul>	
Datasheet: see <a href="http://www.kistler.com">www.kistler.com</a>		9317C (003-124)	9327C (000-725)	

<sup>1)</sup> disregarding bending

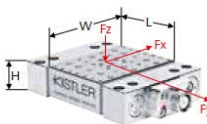
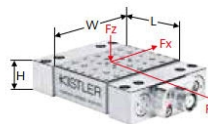
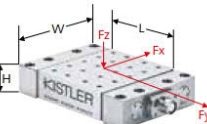


Slika 20. Odgovarajući višeksijalni senzor sile tvrtke Kistler [17]

9347C	9367C	9377C
		
-5 ... 5 -30 ... 30	-10 ... 10 -60 ... 60	-30 ... 30 -150 ... 150
0 ... 0,5 / 0 ... 5 0 ... 3 / 0 ... 30	0 ... 1 / 0 ... 10 0 ... 6 / 0 ... 60	0 ... 3 / 0 ... 30 0 ... 15 / 0 ... 150
≈-7,8 ≈-3,7	≈-7,6 ≈-3,9	≈-3,9 ≈-1,95
55x55x60	80x80x90	120x120x125
0,89 2,7	1,2 3,8	3,2 8,2
≈3,6 ≈10	≈2,4 ≈6	≈2 ≈6
1000	3000	10500
-40 ... 120	-40 ... 120	-40 ... 120
V3 neg.	V3 neg.	V3 neg.
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•
•	•	•
9347C (000-604)	9367C (000-613)	9377C (000-612)

Slika 21. Odgovarajući višeksijalni senzori sile tvrtke *Kistler* [17]

Višeksijalni dinamometri proizvođača *Kistler* koji bi odgovarali traženom rasponu mjerenja normalne sile zaokruženi su na [Slika 22] i [Slika 23]. Na [Slika 23] također je prikazan dinamometar oznake 9272 koji omogućuje mjerenje momenta torzije do 200 Nm te normalne sile do 20 kn kada je opterećen tlačno. Ovakav senzor omogućio bi realizaciju uređaja s manjim brojem senzora. Općenito dinamometri proizvođača *Kistler* primjenjuju se za mjerenje sila prilikom obrade odvajanja čestica. Konstruirani su tako da imaju veliku vlastitu prirodnu frekvenciju od 3kHz što uvelike umanjuje negativan utjecaj dinamike na mjerni signal. Navedeni senzori, također, posjeduju patentirani sustav kompenzacije mjenog signala uzrokovanog zagrijavanjem. Iz navedenih razloga ovakav tip senzora, također, je pogodan za primjenu u ispitnom uređaju.

## Multi-component Dynamometers / Force Measurement Platforms

Technical Data		Type	9119AA1	9119AA2	9129AA
					
Measuring range	Fx, Fy Fz Mz	kN kN Nm	-4 ... 4 -4 ... 4	-4 ... 4 -4 ... 4	-10 ... 10 -10 ... 10
Calibrated meas. ranges	Fx, Fy  Fz  Mz	kN  kN  N-m	0 ... 0,04 0 ... 0,4 0 ... 4 0 ... 0,04 0 ... 0,4 0 ... 4	0 ... 0,04 0 ... 0,4 0 ... 4 0 ... 0,04 0 ... 0,4 0 ... 4	0 ... 0,1 0 ... 1 0 ... 10 0 ... 0,1 0 ... 1 0 ... 10
Natural frequency	$f_n(x)$ $f_n(y)$ $f_n(z)$ $f_n(Mz)$	kHz kHz kHz kHz	≈6,0 ≈6,4 ≈6,3	≈4,3 ≈4,6 ≈4,4	≈3,5 ≈4,5 ≈3,5
Sensitivity	Fx Fy Fz Mz	pC/N pC/N pC/N pC/Nm	≈-26 ≈-13 ≈-26	≈-26 ≈-13 ≈-26	≈-8 ≈-4,1 ≈-8
Dimensions	L W H D	mm mm mm mm	39 80 26	55 80 26	90 105 32
Weight		kg	0,93	1,35	3,2
Operating temperature range		°C	-20 ... 70	-20 ... 70	-20 ... 70
Connector			Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.
Deg. of protection to IEC/EN 60529 with cable connected	IP67		•	•	•
Ready for measurement			•	•	•
Datasheet: see <a href="http://www.kistler.com">www.kistler.com</a>			9119AA1 (003-060)	9119AA2 (003-055)	9129AA (000-709)
<b>Accessories</b>					
Connecting cable	Type		1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)	1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)	1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)
			1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)	1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)	1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)
					

<sup>1)</sup> depending on cover plate size and material

<sup>2)</sup> mounted on steel cover plate, 300 × 300 × 35 mm

Slika 22. Višeaksijalni dinamometar [17]

9139AA	9255C	9257B	9272	9366CC...
-30 ... 30 -30 ... 30	-30 ... 30 -10 ... 60	-5 ... 5 -5 ... 10	-5 ... 5 -5 ... 20 -200 ... 200	-25 ... 25 <sup>1)</sup> -25 ... 60 <sup>1)</sup>
0 ... 0,3 0 ... 3 0 ... 30 0 ... 0,3 0 ... 3 0 ... 30	0 ... 3 0 ... 30  0 ... 6 0 ... 60	0 ... 0,5 0 ... 5  0 ... 1 0 ... 10	0 ... 0,5 0 ... 5  0 ... 2 0 ... 20  0 ... ±20 0 ... ±200	0 ... 2,5 <sup>1)</sup> 0 ... 25 <sup>1)</sup>  0 ... 6 <sup>1)</sup> 0 ... 60 <sup>1)</sup>
≈2,9 ≈2,9 ≈3,0	≈2,2 ≈2,2 ≈3,3	≈2,3 ≈2,3 ≈3,5	≈3,1 ≈3,1 ≈6,3 ≈4,2	≈0,2 ... ≈1,6 <sup>2)</sup> ≈0,2 ... ≈1,6 <sup>2)</sup> ≈0,2 ... ≈1,6 <sup>2)</sup>
≈-8,2 ≈-4,2 ≈-8,2	≈-7,9 ≈-7,9 ≈-3,9	≈-7,5 ≈-7,5 ≈-3,7	≈-7,8 ≈-7,8 ≈-3,5 ≈-160	≈-7,8 ≈-7,8 ≈-308
140 190 58	260 260 95	170 100 60	70 100	90 72
12,9	52	7,3	4,2	7
-20 ... 70	-20 ... 70	0 ... 70	0 ... 70	-20 ... 70
Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.	Fischer flange, 9-pole, neg.
• •	• •	• •	• •	•
9139AA (003-198)	9255C (003-051)	9257B (000-151)	9272 (000-153)	9366C (000-681)
1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)	1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)	1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)	1677A5 (6-component)	1687B5 (3-component), 1677A5 (6-component)
1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)	1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)	1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)	1679A5 (6-component)	1689B5 (3-component), 1679A5 (6-component)

Slika 23. Višeaksijalni dinamometar sile i momenta 9272 [17]



Ukoliko koncepcija uređaja bude takva da se zasebno mjeri normalna sila, a zasebno okretni moment potrebno bi bilo izvršiti pregled postojećih senzora sile i okretnog momenta. Na [Slika 24] prikazan je adekvatni senzor momenta, a na [Slika 25] adekvatni senzor sile.

### Reaction Torque Sensors (Piezoelectric)

Dynamometer



Type 9329A

Technical Data	Type	9329A	9339A	9349A
Measuring range	N-m	-1 ... 1	-10 ... 10	-25 ... 25
Calibrated meas. ranges	N-m	0 ... -1 0 ... -0,1 0 ... 0,1 0 ... 1	0 ... -10 0 ... -1 0 ... 1 0 ... 10	0 ... -25 0 ... -2,5 0 ... 2,5 0 ... 25
Sensitivity	pC/N-m	≈-2170	≈-460	≈-230
Rigidity	$C_{Mz}$ N-m/μrad	≈0,02	≈0,10	≈0,19
Dimensions	D	mm 20	30	36
	H	mm 26	34	42
Weight	g	50	137	243
Operating temperature range	°C	-20 ... 80	-40 ... 120	-40 ... 120

Technical Data	Type	9369A	9389A
Measuring range	N-m	-200 ... 200	-1000 ... 1000
Calibrated meas. ranges	N-m	0 ... -200 0 ... -20 0 ... 20 0 ... 200	0 ... -1000 0 ... -100 0 ... 100 0 ... 1000
Sensitivity	pC/N-m	≈-130	≈-100
Rigidity	$C_{Mz}$ N-m/μrad	≈0,90	≈1,54
Dimensions	D	mm 54	100
	H	mm 60	130
Weight	g	800	6 720
Operating temperature range	°C	-40 ... 120	-40 ... 120

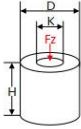




General Technical Data	
Deg. of protection to IEC/EN 60529	IP65 with connected cable IP67 with cable, Type 1983AD... and welded connector
Connector	KIAG 10-32 neg.
Preloaded	•
Calibrated	•
Data sheet: see <a href="http://www.kistler.com">www.kistler.com</a>	9329A (000-463)

Accessories	
Mounting flange	Type 9580A...








Slika 24. Piezoelektrični senzor momenta [17]

## 1-Component Quartz Force Links, Press Force

Technical Data		Type	9313AA1	9313AA2	9323AA	9323A
						
Measuring range	Fz	kN	0 ... 5	0 ... 20	0 ... 10	0 ... 20
Permissible tensile force	Fz	kN	0 ... -0,5	0 ... -2	0 ... -1	0 ... -2
Calibrated meas. ranges	Fz	kN	0 ... 0,05	0 ... 0,2	0 ... 0,1	0 ... 0,2
	Fz	kN	0 ... 0,5	0 ... 2	0 ... 1	0 ... 2
	Fz	kN	0 ... 5	0 ... 20	0 ...	0 ... 20
Sensitivity	Fz	pC/N	≈ -10	≈ -10	≈ -9,6	≈ -3,9
Output signal		V				
Dimensions	D	mm	13	19	20	20
	K	mm	M2,5	M4	M5 × 0,5	M5 × 0,5
	H	mm	10	14	26	26
Rigidity	c <sub>Az</sub>	kN/μm	≈ 0,56	≈ 1,50	≈ 1,30	≈ 1,20
Natural frequency	f <sub>n</sub> (z)	kHz	> 38	> 35	> 74,5	> 72
Weight	g		10	25	50	47
Operating temp. range <sup>1)</sup>	°C		-40 ... 120	-40 ... 120	-40 ... 120	-40 ... 120
Connector			KIAG 10-32 neg.	KIAG 10-32 neg.	KIAG 10-32 neg	KIAG 10-32 neg
Deg. of protection to IEC/EN 60529	screwed with cable (e.g. 1631C...)	IP65	•	•	•	•
	welded with cable (e.g. 1983AD...)	IP67	•	•	•	•
	screwed with cable (e.g. 1787A...)	IP67				
Preloaded			•	•	•	•
Ready for measurement			•	•	•	•
Datasheet: see <a href="http://www.kistler.com">www.kistler.com</a>			9313 (000-705)	9313 (000-705)	9323 (000-704)	9323 (000-704)

## Accessories

<b>Flange</b> Dimensions		Type	9580A7	9580A8	9580A9	9580A9
		D (mm) H (mm)	27 7	35 8	40 8	40 8
<b>Force distributing cap</b> Dimensions		Type	9500A00	9500A01	9582A9	9582A9
		D (mm) H (mm)	6 3	10,5 5	20 8,5	20 8,5
<b>Spigot</b> Dimensions		Type	9590A7	9590A8		
		D (mm) L (mm)	5 12,5	10 20,5		
<b>Female Thread Adapter</b> Dimensions		Type			9584A9	9584A9
		D (mm) H (mm)			20 8	20 8
<b>Male Thread Adapter</b> Dimensions		Type			9586A9	9586A9
		D (mm) H (mm)			20 8	20 8

1) operating temperature range depends on the cable used

Slika 25. Senzori sile [17]

## 4.2. Pregled elektromotora

Prije faze koncipiranja potrebno je izvršiti pregled servo elektromotora koji ispunjava projektne zahtjeve (kratkotrajni okretni moment 400 Nm te najveća brzina vrtnje 3000 okr/min) kako bismo usmjerenije generirali koncepte. Servo elektromotori proizvođača SIEMENS serije 1FT6 oznaka 1FT6163-8SD7 te 1FT6163-8WD7 ispunjavaju tražene projektne zahtjeve što je vidljivo iz dijagrama brzine vrtnje i momenta prikazanih na [Slika 26],[Slika 27].

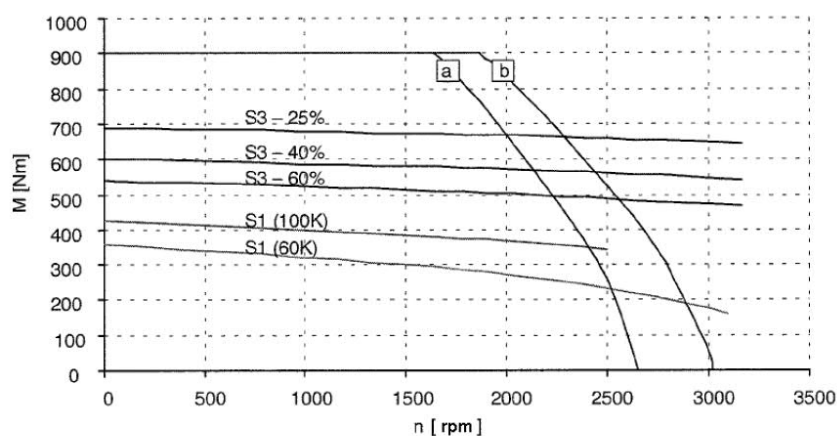


Fig. 3-76 Speed-torque diagram 1FT6163-8SD7

- [a] MASTERDRIVES MC,  $V_{DC \text{ link}} = 540 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{Mot} = 340 \text{ V}_{rms}$   
 [b] MASTERDRIVES MC (AFE),  $V_{DC \text{ link}} = 600 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{mot} = 380 \text{ V}_{rms}$

Slika 26. Dijagram elektromotora 1FT6163-8SD7 [14]

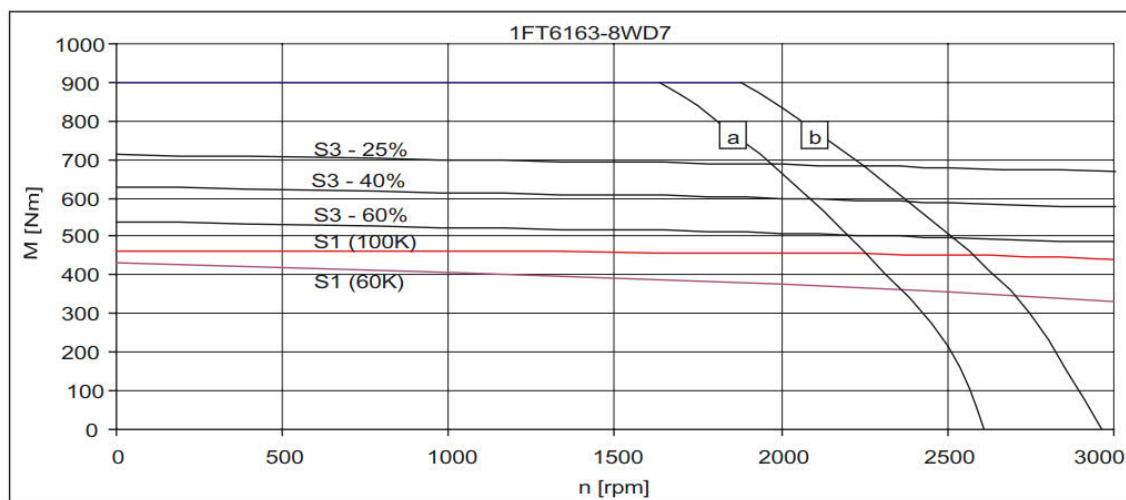


Fig. 3-104 Speed-torque diagram 1FT6163-8WD7□

Slika 27. Dijagram elektromotora 1FT6163-8WD7 [14]

### 4.3. Pregled aktuatora

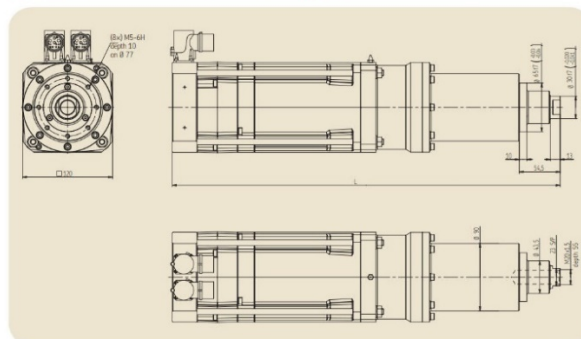
Prilikom ispitivanja potrebno je ostvariti adekvatnu normalnu silu te je potrebno omogućiti otvaranje i zatvaranje uređaja kako bi se omogućila izmjena ispitnog uzorka tarne ploče spojke i reaktivnih komponenata. Iz tog razloga aktuatori moraju moći ostvariti dovoljan hod. Odabir aktuatora uvelike će ovisiti o finalnoj koncepciji uređaja. U obzir dolaze elektromehanički aktuatori, hidraulički i pneumatski aktuatori dvostrukog djelovanja.

#### 4.3.1. Elektromehanički aktuatori

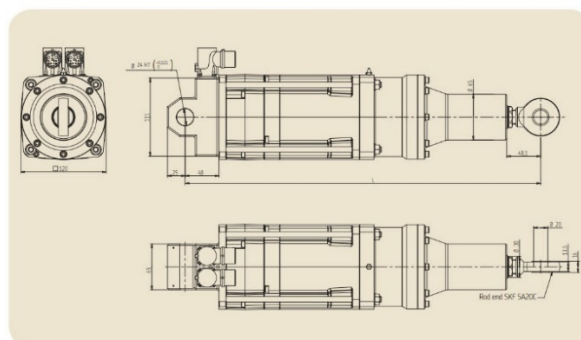
Elektromehanički aktuatori pogonjeni su servo elektromotorom pri čemu se vrtnja motora preko vretena pretvara u aksijalno gibanje. Odlikuje ih kompaktnost, jednostavnost te pouzdanost u radu. Na [Slika 28] prikazana je potencijalno primjenjiva izvedba kompaktnog elektromehaničkog aktuatora, a na [Slika 29] tehnički podaci kompaktne izvedbe elektromehaničkih aktuatora.

Compact cylinders

CEMC24•••••1-6•• - Design 1



CEMC24•••••2-6•• - Design 2



SKF

53

Slika 28. Elektromehanički aktuator SKF [32]

## Compact cylinders

## Compact range

## Performance specifications

Designation	Screw lead	Nominal force <sup>(1)</sup>	Peak force <sup>(2)</sup>	Linear speed	Standard stroke	Over-stroke <sup>(4)</sup>	Dynamic load	Nominal power	Controller size <sup>(5)</sup>
	mm	kN	kN	mm/s	mm	mm	kN	kW	-
CEMC1804-145-1-42J	3,75	4,7	10,3	350	145	1 (x2)	26,6	1,6	08
CEMC2404-....-62L	4,00	8,7	23,8	300	125-135-170	1 (x2)	61,0	2,6	16
CEMC2406-125-..-62L	6,00	5,8	15,9	450	125	1 (x2)	61,0	2,6	16
CEMC2404-....-63I	4,00	13,1	26,0	300	125-135-170	1 (x2)	61,0	3,3	16
CEMC2406-125-..-63I	6,00	8,7	17,3	450	125	1 (x2)	61,0	3,3	16

## Ultra compact range

3

## Performance specifications

Designation	Screw lead	Nominal force <sup>(1)</sup>	Peak force <sup>(2)</sup>	Linear speed	Standard stroke	Over-stroke <sup>(4)</sup>	Dynamic load	Nominal power	Controller size <sup>(5)</sup>
	mm	kN	kN	mm/s	mm	mm	kN	kW	-
CEMC2104-170-..-D63L	4	9,0	17,9	353	170	1 (x2)	48,1	2,3	16
CEMC2404-....-2-D82P	4	14,1	28,2	320	90-170	1 (x2)	61,0	4,7	16
CEMC2406-....-2-D82P	6	9,4	18,8	480	90-170	1 (x2)	61,0	4,7	16
CEMC3004-....-2-D82P	4	14,1	28,2	266	90-170	1 (x2)	105,0	3,9	16
CEMC3006-....-2-D82P	6	9,4	18,8	400	90-170	1 (x2)	105,0	3,9	16
CEMC3004-....-2-D84H	4	27,4	53,1	266	90-170	1 (x2)	105,0	6,2	32
CEMC3006-....-2-D84H	6	18,3	35,4	400	90-170	1 (x2)	105,0	6,2	32
CEMC3004-....-2-D86F	4	39,5	83,4	266	90-170	1 (x2)	105,0	6,6	50
CEMC3006-....-2-D86F	6	26,3	55,6	400	90-170	1 (x2)	105,0	6,6	50

(1) Nominal force: can be used 100 % of time at low speed (10 % of maximum speed).

(2) Peak force: max force under short time (1 s max) at low speed with selected drive.

(4) Integrated at each end.

SKF

49

Slika 29. Tehnički podaci elektromehaničkih aktuatora [32]



### 4.3.2. Pneumatski aktuator

Pneumatski aktuatori kao radni medij koriste stlačeni zrak. Energija stlačenog zraka pretvara se u mehaničku energiju djelovanjem tlaka na površinu klipa. Kako bi se zrak stlačio potreban je pneumatski sustav sa kompresorom te nizom ventila i regulatora koji omogućuju kontrolu djelovanja pneumatskog cilindra što znači da će izvedba stroja s pneumatskim aktuatorima biti kompleksnija. Na [Slika 30] prikazane su razne varijante pneumatskog aktuatora s raznim prihvratima i njihovim tehničkim podacima.



CP96 and C96 – Accesories/Related Products

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Bore size [mm]	Foot (Supplied with two pieces and 4 screws)	Female head end clevis (Corresponds to E accessory (Supplied with bolt, safety device and 4 screws))	Male head end clevis (Supplied with bolt, safety device and 4 screws)	Female head end clevis (for E accessory) (Supplied with bolt, safety device and 4 screws)	Male head end clevis with ball joint (Supplied with 4 screws)	Rod-head end flange (Supplied with 4 screws)	Angled head end clevis	Angled head end clevis with ball joint	Piston rod ball joint (ISO 8139)	Rod clevis (ISO 8140) (Supplied with bolt and safety device)	Floating joint	Auto switch mounting bracket (C96 only)
32	L5032	D5032	C5032	DS5032	CS5032	F5032	E5032	ES5032	KJ10D	GKM10-20	JA30-10-125	BMB5-032
40	L5040	D5040	C5040	DS5040	CS5040	F5040	E5040	ES5040	KJ12D	GKM12-24	JA40-12-125	
50	L5050	D5050	C5050	DS5050	CS5050	F5050	E5050	ES5050	KJ16D	GKM16-32	JA50-16-150	BA7-040
63	L5063	D5063	C5063	DS5063	CS5063	F5063	E5063	ES5063	KJ16D	GKM16-32	JA50-16-150	
80	L5080	D5080	C5080	DS5080	CS5080	F5080	E5080	ES5080	KJ20D	GKM20-40	JA50-20-150	BA7-063
100	L5100	D5100	C5100	DS5100	CS5100	F5100	E5100	ES5100	KJ20D	GKM20-40	JA50-20-150	
125	L5125	D5125	C5125	DS5125	CS5125	F5125	E5125	ES5125	KJ27D	GKM30-54	JA125-27-200	BA7-080

Bore size [mm]	13	14	15	16	17	18	19
ø tube	Speed controller in-line type	Speed controller universal type	Dual speed controller	Air saving valve Pressure valve	Air saving valve Flow valve	Speed controller in-line type	Auto switch
Part number	Part number	Part number	Part number	Part number	Part number	Part No. <sup>Note 1)</sup>	Solid state type - 2 colour indication
32	AS2201F-01-23A	AS2301F-01-23	—	—	—	4 AS2002F-04	D-M9BWL 2 wire 3 m
	AS2201F-01-04SA	AS2301F-01-04S	—	—	—	6 AS2052F-06	D-M9PWL 3 wire PNP 3 m
	AS2201F-01-06SA	AS2301F-01-06S	ASD330F-01-06S	—	—		D-M9PWSAPC M8-3pin PNP 0.5 m
	AS2201F-01-08SA	AS2301F-01-08S	ASD330F-01-08S	—	—		For ATEX <sup>Note 2)</sup>
40, 50	AS2201F-02-04SA	AS2301F-02-04S	—	—	—	8 AS2052F-08	D-M9BWL 2 wire 3 m
	AS2201F-02-06SA	AS2301F-02-06S	ASD430F-02-06S	ASR430F-02-06S	ASQ430F-02-06S	6 AS3002F-06	D-M9PWL 3 wire PNP 3 m
	AS2201F-02-08SA	AS3301F-02-08S	ASD530F-02-08S	ASR530F-02-08S	ASQ530F-02-08S	8 AS3002F-08	D-M9PWSAPC M8-3pin PNP 0.5 m
	AS2201F-02-10SA	AS3301F-02-10S	ASD530F-02-10S	ASR530F-02-10S	ASQ530F-02-10S	10 AS3002F-10	
63, 80	—	AS3301F-02-12S	ASD530F-02-12S	ASR530F-02-12S	ASQ530F-02-12S	12 AS3002F-12	Read type
	AS3201F-03-06SA	AS3301F-03-06S	ASD630F-03-06S	ASR630F-03-06S	ASQ630F-03-06S	6 AS3002F-06	Part No. Wiring Cable
	AS3201F-03-08SA	AS3301F-03-08S	ASD630F-03-08S	ASR630F-03-08S	ASQ630F-03-08S	8 AS3002F-08	D-A93L 2 wire 3 m
	AS3201F-03-10SA	AS3301F-03-10S	ASD630F-03-10S	ASR630F-03-10S	ASQ630F-03-10S	10 AS4002F-10	D-A93SAPC M8-3pin 0.5 m
	AS3201F-03-12SA	AS3301F-03-12S	ASD630F-03-12S	ASR630F-03-12S	ASQ630F-03-12S	12 AS4002F-12	For ATEX <sup>Note 2)</sup>
100, 125	AS4201F-04-10SA	AS4301F-04-10S	ASD630F-04-10S	ASR630F-04-10S	ASQ630F-04-10S	80, 100, 125 AS4002F-10	D-A93L 2 wire 3 m
	AS4201F-04-12SA	AS4301F-04-12S	ASD630F-04-12S	ASR630F-04-12S	ASQ630F-04-12S	12 AS4002F-12	D-A93SAPC M8-3pin 0.5 m

Note 1) Ø125: Can also use a large flow in-line type speed controller: AS420-04  
 Note 2) When mounting an auto switch on a 55-series (Category 2) model, the ATEX class of the cylinder with auto switch changes to Category 3, which is the same class as the auto switch. Auto switch only conforms to Category 3. (II 3GD EEx nA II T5x -10°C ≤ Ta ≤ +60°C IP67)

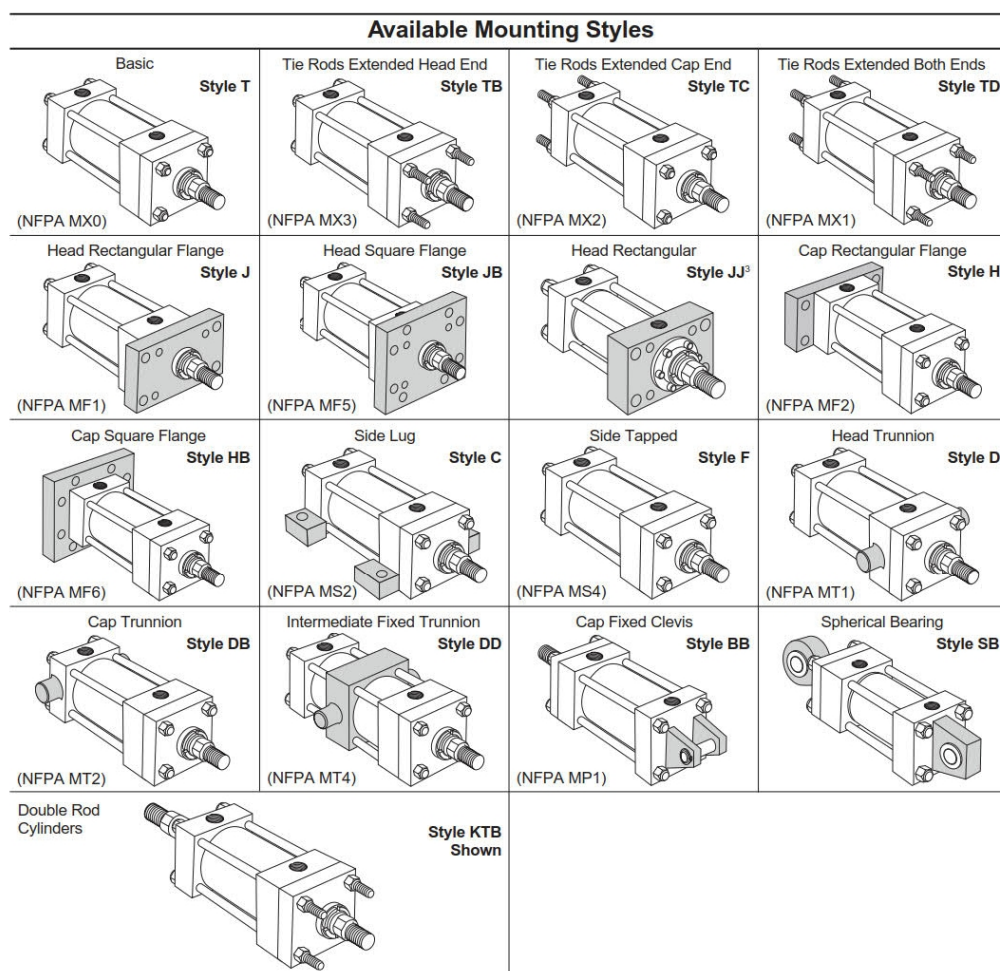


Slika 30. Pneumatski cilindri SMC [33]

### 4.3.3. Hidraulički aktuator

#### Hidraulički aktuator

Hidraulički aktuatori kao radni medij koriste energiju hidrauličkog ulja pod tlakom. Energija hidrauličkog ulja pretvara se u mehaničku energiju djelovanjem tlaka na površinu klipa. Kako bi se stvorio dovoljan tlak u hidrauličkom sustavu potrebna je pumpa te niz ventila i regulatora koji omogućuju kontrolu djelovanja hidrauličkog cilindra što znači da će izvedba stroja s pneumatskim aktuatorima biti kompleksnija. Na [Slika 31] prikazane su razne varijante hidrauličkih aktuatora s raznim prihvataima.



<sup>3</sup> Parker Style JJ mount for the Series 3L is a non-NFPA mount.  
Most of the above illustrated mounting styles are available in double rod cylinders.



3  
www.parker.com/cylinder

Parker Hannifin Corporation  
Cylinder Division  
Des Plaines, Illinois USA

Slika 31. Hidraulički aktuatori [34]

#### 4.4. Senzori temperature

Prilikom mjerenja potrebno je pratiti temperaturu reaktivnih članova do 320 °C. Dobivena informacija o temperaturi koristi se kao jedan od ulaznih parametara za regulaciju temperature ali i kao relevantna informacija za identifikaciju karakteristika trenja. Prostor ugradnje senzora temperature relativno je ograničen zato što senzor temperature mora biti što bliže reaktivnom članu odnosno u idealnom slučaju ugrađen direktno u reaktivni član. Kao moguće tehničko rješenje nameću se senzori temperature serije PR20 proizvođača OMEGA [Slika 32] koji se odlikuju vrlo malim dimenzijama, a omogućuju mjerenje do traženih temperatura.

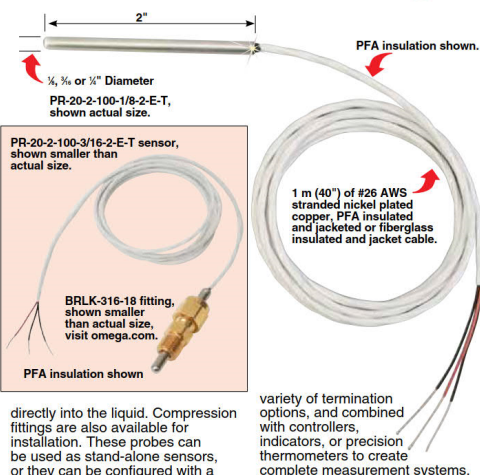
### Short RTD Probe

PR-20 Series



- ✓ 2" Compact Design for Applications with Space Restrictions
- ✓ Transitions Directly to Lead Wires (No Transition Fitting)
- ✓ Temperature Range:  
PFA: -50 to 260°C (-58 to 500°F)  
Fiberglass: -50 to 450°C (-58 to 842°F)  
Depending on Cable Selection
- ✓ High-Accuracy, 100 Ω, Class "A" DIN Platinum Elements per IEC751 (alpha = 0.00385 Ω/Ω°C)
- ✓ 2-, 3-, 4-Wire Constructions Available

These general purpose 2" long sensors can be used in most liquid and air applications. When used in liquid environments, the epoxy-sealed end should not be immersed



To Order Visit [omega.com/pr-20](http://omega.com/pr-20) for Pricing and Details

Model Number	Probe Diameter (inch)	Lead Wire Style*	Max Temp Range °C (°F)
PR-20-2-100-1/8-2-E-T	1/8	3-wire/PFA insulation	260 (500)
PR-20-2-100-3/16-2-E-T	3/16	3-wire/PFA insulation*	260 (500)
PR-20-2-100-1/4-2-E-T	1/4	3-wire/PFA insulation*	260 (500)
PR-20-2-100-1/8-2-E-G	1/8	3-wire/fiberglass insulation	450 (842)
PR-20-2-100-3/16-2-E-G	3/16	3-wire/fiberglass insulation*	450 (842)
PR-20-2-100-1/4-2-E-G	1/4	3-wire/fiberglass insulation*	450 (842)

\*Note: For leads longer than 40', add "(desired length in inches)" to the model number for additional price.

\*For 4 wire configurations change the "2" to a "3" in the model number for additional price.

4-wire constructions are not available in 1/8" diameters.

Terminations Available: for "LUG", for "OTP" and "MTP" connectors. Visit [omega.com](http://omega.com) for additional price.

Ordering Example: PR-20-2-100-3/16-2-E-T, 2", 1/8" diameter, 3-wire 100 Ω RTD probe with 40' PFA insulated lead wire.

#### Accessories

Model Number	Description
MTP-U-M	Miniature male 3-prong flat pin connector
OTP-U-M	Heavy-duty male 3-prong round pin connector
DPI32	1/8" DIN panel meter
SSLK-18-18	Compression fitting for 1/8" probe with 1/8" male NPT
SSLK-14-14	Compression fitting for 1/4" probe with 1/4" male NPT
SSLK-316-14	Compression fitting for 3/16" probe with 1/4" male NPT
SSLK-316-18	Compression fitting for 3/8" probe with 1/2" male NPT

C-82

Slika 32. Senzor temperature [35]



#### 4.5. Senzori položaja

Prilikom rada uređaja potrebno je pratiti relativnu poziciju reaktivnih elemenata kako bismo mogli adekvatno provoditi ispitivanja tarnih ploči spojki. Iz tog razlog potrebno je odabrati senzore položaja koji omogućuju dovoljnu preciznost pri velikom broju ponavljanja i pouzdani su. Kao moguće tehničko rješenje nameću se senzori položaja serije LD 500 proizvođača OMEGA [Slika 33] koji se odlikuju velikom preciznošću za velik broj ponavljanja i kompaktne su građe.

### PRECISION DC GAGING TRANSDUCERS FOR QUALITY CONTROL OR AUTOMATION TOOLING

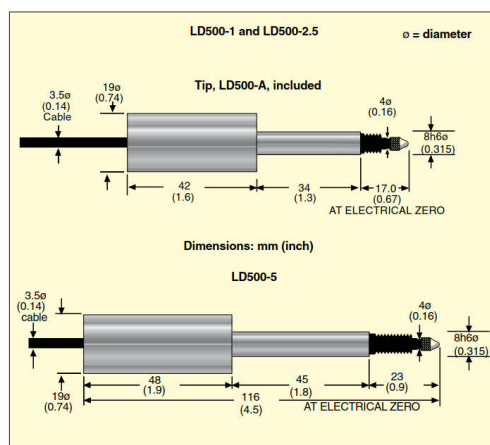


#### LD500 Series



- ✓ High Accuracy and Repeatability
- ✓ Rugged Industrial Construction
- ✓ Replaceable Tips
- ✓ Repeatability Better Than  $0.15 \mu\text{m}$
- ✓ Linear Ball-Bearing Actuator

These precision-manufactured displacement transducers can be mounted to most production lines to perform automatic gaging for quality, sorting, or go/no-go applications. The hardened steel shaft, O-ring seals, and titanium pushrod can withstand most industrial conditions. The hybrid IC module produces a linear mV/mm (or inch) output that will interface with most standard DC input meters, recorders, data interfaces, and industrial controllers.



J-13

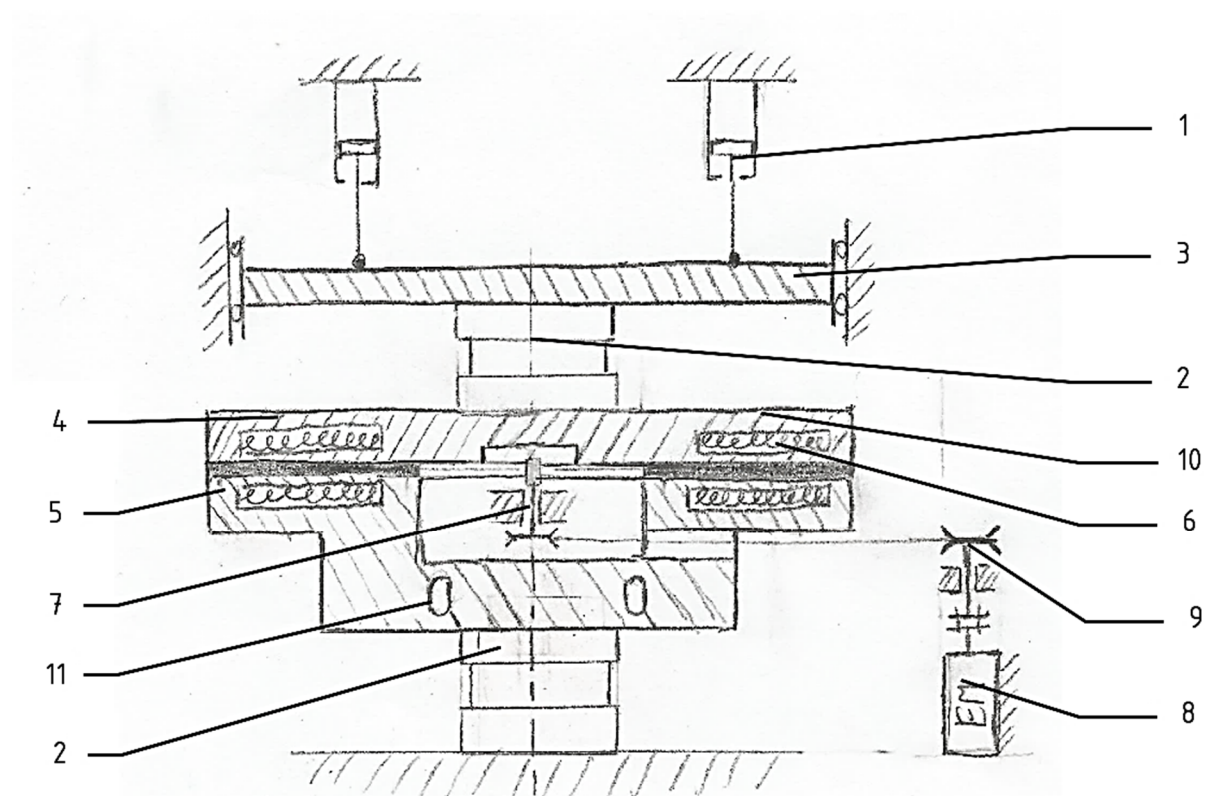
Slika 33. Senzor položaja [35]

## 5. Generiranje koncepata

Kako je potrebno projektirati ispitni uređaj za identifikaciju karakteristika trenja i trošenja materijala suhe spojke gdje je ispitni uzorak tarna ploča automobilske suhe spojke, a reaktivni elementi su komponente izrezane iz potisne ploče, razmatrani su koncepti koji omogućuju navedeni način ispitivanja. Kroz devet koncepata pokrivena su različite kombinacije strukture uređaja s obzirom na os rotacije (vertikalna/horizontalna), izvedbu senzora (višeosni senzori sile, senzor momenta torzije i normalne sile), broj tarnih ploha (jedna/dvije) te mehanizme linearnog pomaka (hidraulički, cilindar/vreteno/ball and ramp).

### 5.1. Vertikalna os

#### 5.1.1. Koncept 1



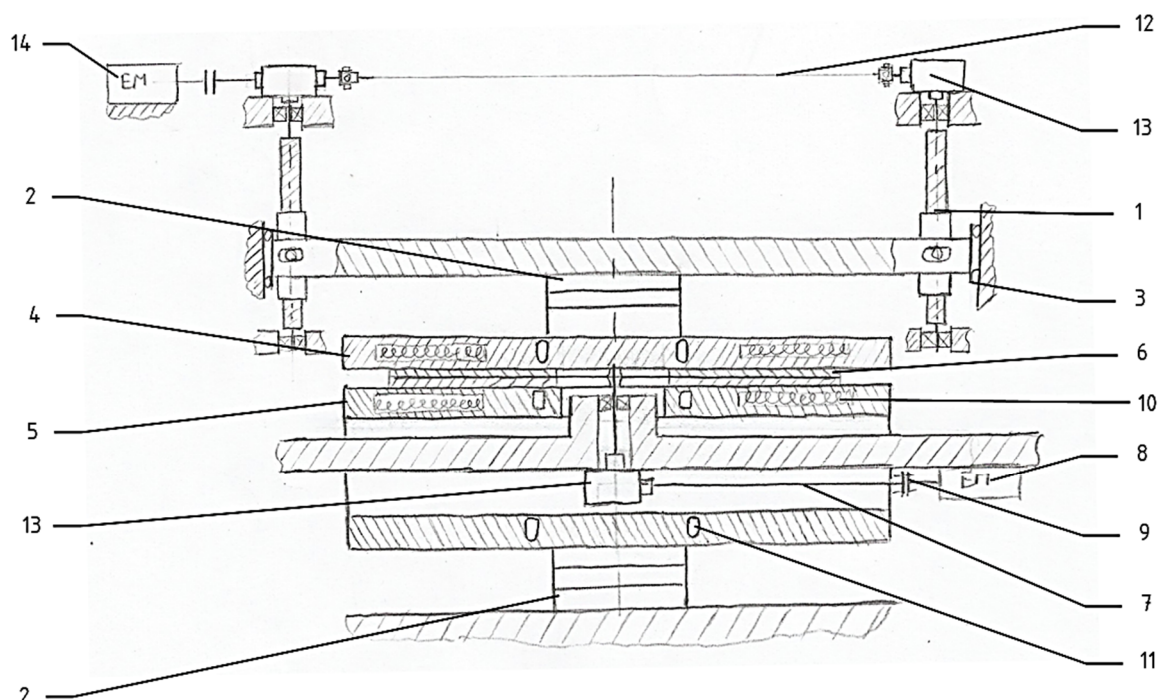
1-Hidraulički cilindar, 2-senzor momenta torzije i normalne sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tarna ploča spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-remenski prijenos, 10-elektrotoporni grijač, 11-kanali za hlađenje

Slika 34. Koncept 1

Elektromotor (8) preko zupčastog remenskog prijenosa (9) pokreće tarnu ploču spojke (6). Hidraulički cilindri (1) ostvaruju potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi

na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na senzore normalne sile i momenta (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je reakcijski član (4) izveden kao pomičan član te je preko senzora (2) pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.1.2. Koncept 2



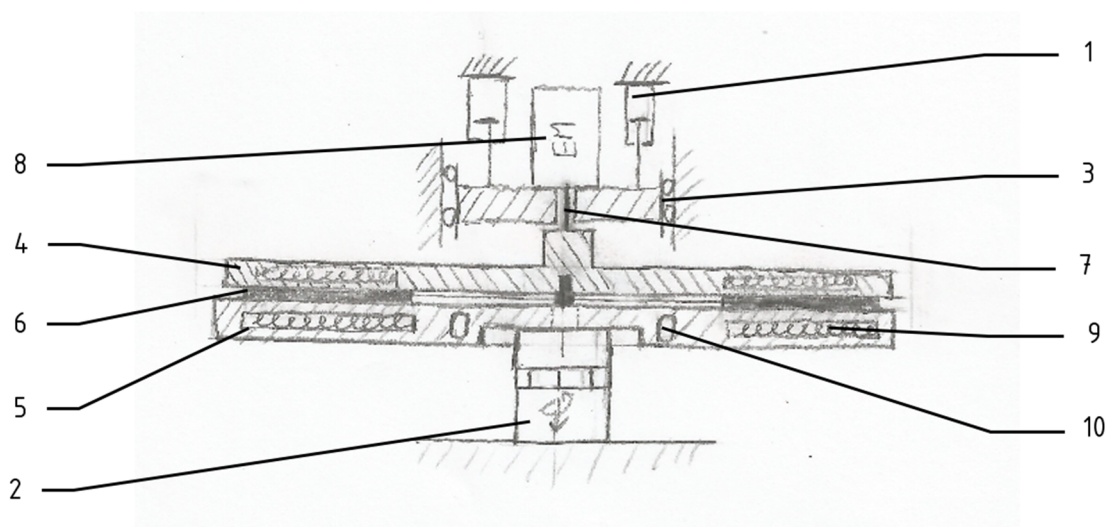
1-Vreteno, 2-senzor momenta torzije i normalne sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje, 12-kardansko vratilo, 13-stožni prijenosnik, 14- electromotor vretena

**Slika 35. Koncept 2**

Elektromotor (8) preko vratila (7) te stožnog prijenosnika snage pokreće tarnu ploču spojke (6). Elektromotor (14) pokretanjem dvaju vretena (1) ostvaruje potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na senzore normalne sile i momenta (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je reakcijski član (4) izveden kao pomičan član te je preko senzora

(2) pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.1.3. Koncept 3



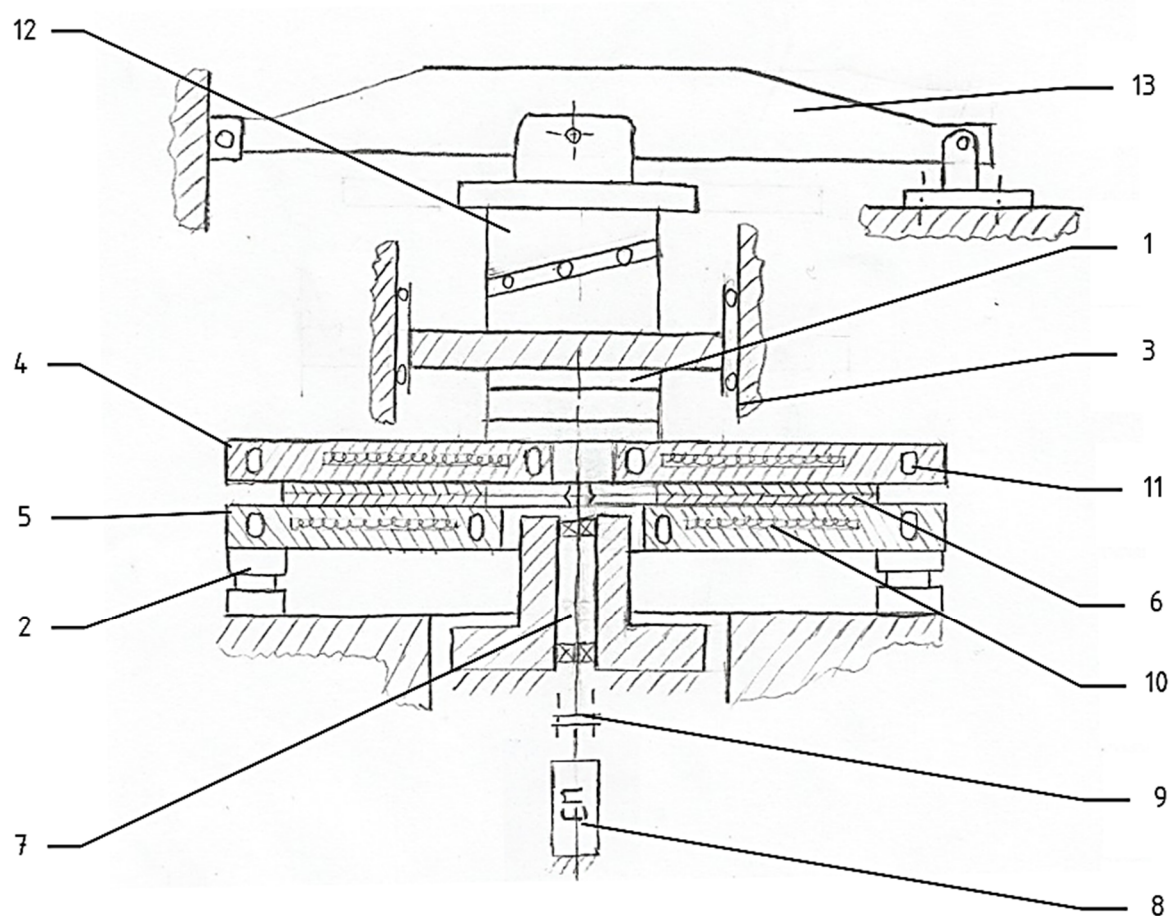
1-Hidraulički cilindar, 2-senzor momenta torzije i normalne sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-elektrootporni grijač, 10-kanali za hlađenje

Slika 36. Koncept 3

Elektromotor (8) preko vratila (7) pokreće pogonski član (4), a time i na njega pričvršćenu tarnu ploču spojke (6). Hidraulički cilindri (1) ostvaruju potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijski član (5) te sukladno tome na senzor momenta torzije i normalne sile (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je pogonski član (4) izveden kao pomičan član te je preko uležištenja pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskog člana i pogonskog ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).



#### 5.1.4. Koncept 4

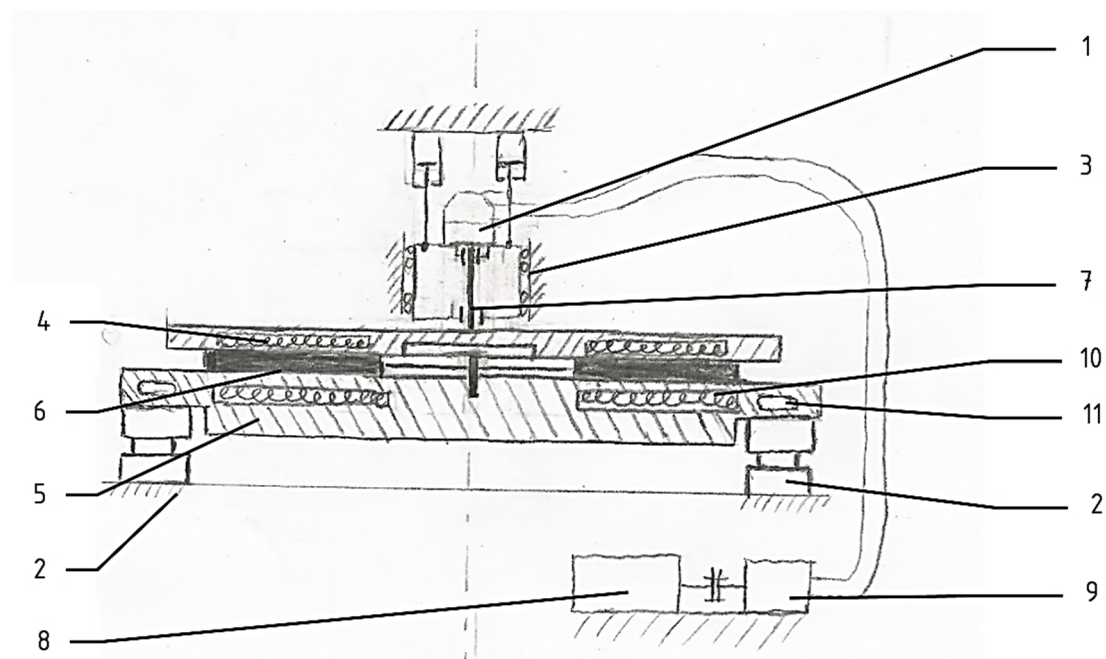


1-Senzor momenta torzije i normalne sile, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje, 12-ball and ramp mehanizam, 13-mehanizam otvaranja

Slika 37. Koncept 4

Elektromotor (8) preko vratila (7) pokreće tarnu ploču spojke (6). Ball and ramp mehanizam (14) ostvaruje potrebnu normalnu silu oslanjajući se o polugu mehanizma otvaranja (13) pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na jednoliko po obodu raspoređena tri višeosna senzora sile (2) te senzora momenta torzije i normalne sile (1). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je reakcijski član (4) izveden kao pomičan član te je preko senzora (1) pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.1.5. Koncept 5

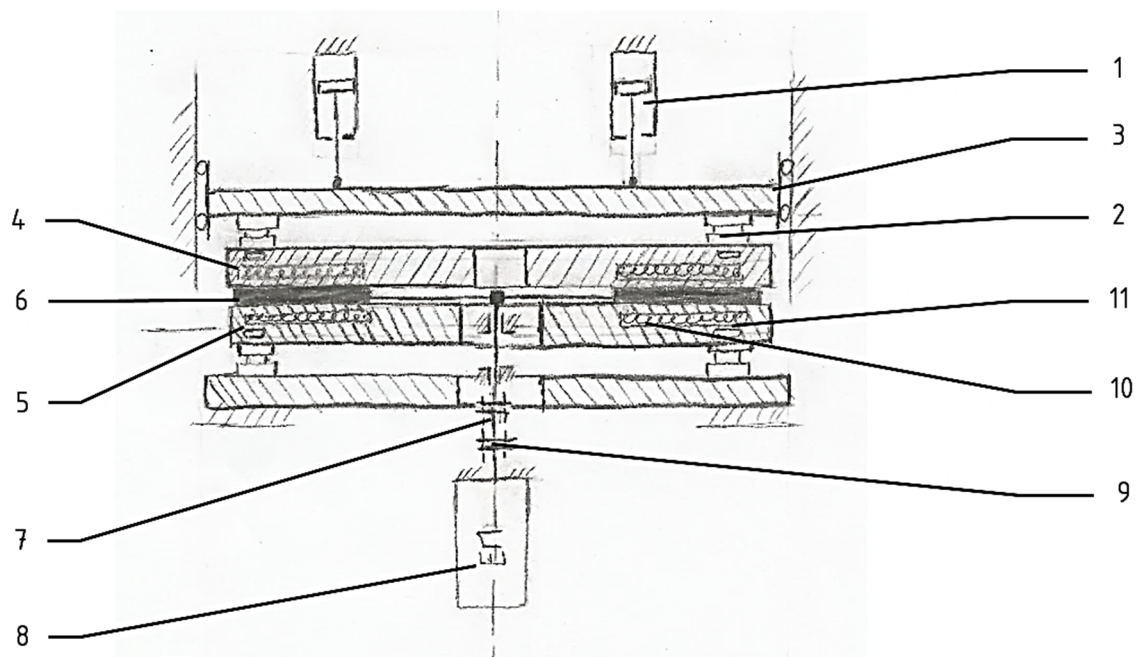


1-Hidraulički cilindar, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4- pogonski član, 5-reakcijski član, 6-tarna ploča spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-hidrostatski prijenosnik, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje

**Slika 38. Koncept 5**

Elektromotor (8) preko hidrostatskog prijenosnika (9) pokreće pogonski član (4). Hidraulički cilindri (1) ostvaruju potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na tarnu ploču spojke (6) i reakcijski član (5) te sukladno tome na tri, po obodu razmještene, višeosne senzora (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja. Za njega je pričvršćena tarnu ploču spojke (6) dok je gonjeni član (4) izveden kao pomičan član te je preko uležištenja fiksiran za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.1.6. Koncept 6

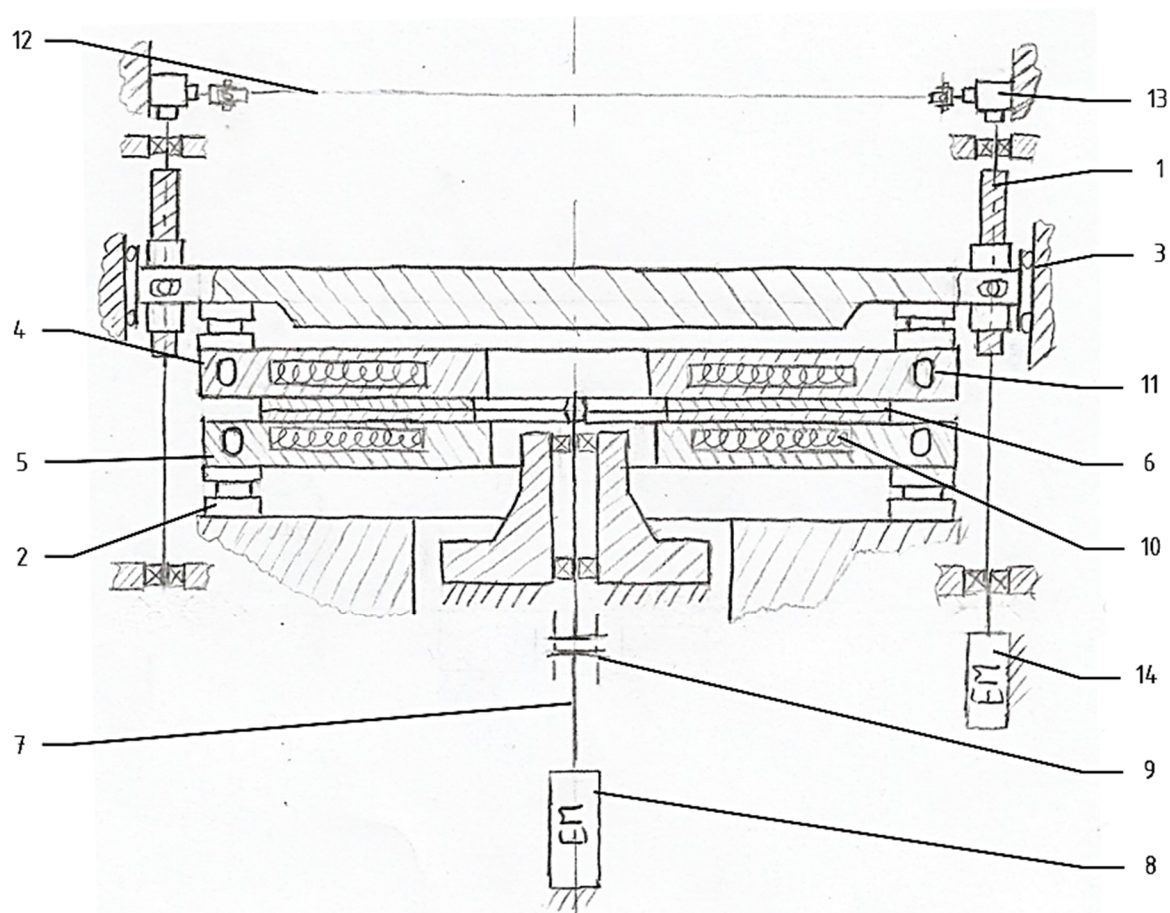


1-Hidraulički cilindar, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje

**Slika 39. Koncept 6**

Elektromotor (8) preko vrtila (7) pokreće tarnu ploču spojke (6). Hidraulički cilindri (1) ostvaruju potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na jednoliku po obodu raspoređena tri višeosna senzora sile (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je reakcijski član (4) izveden kao pomičan član te je preko senzora (2) pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.1.7. Koncept 7



1-Hidraulički cilindar, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje, 12- kardansko vratilo, 13-stožni prijenosnik, 14-elektromotor vretena

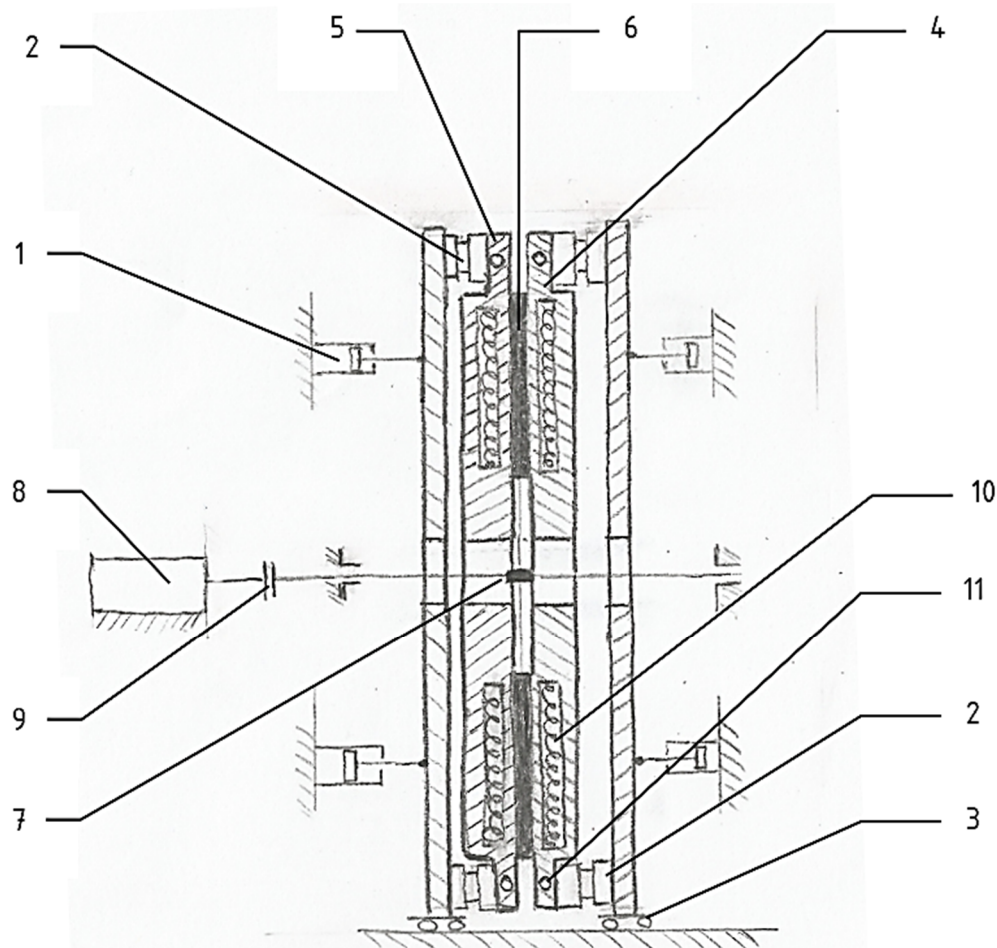
**Slika 40. Koncept 7**

Elektromotor (8) preko vratila (7) pokreće tarnu ploču spojke (6). Elektromotor (14) pokretanjem dvaju vretena (1) ostvaruje potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na jednoliku po obodu raspoređena tri višeosna senzora sile (2). Reakcijski član (5) izveden je kao nepomičan član te je preko senzora pričvršćen za okvir stroja dok je reakcijski član (4) izveden kao pomičan član te je preko senzora (2) pričvršćen za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).



## 5.2. Horizontalna os

### 5.2.1. Koncept 8

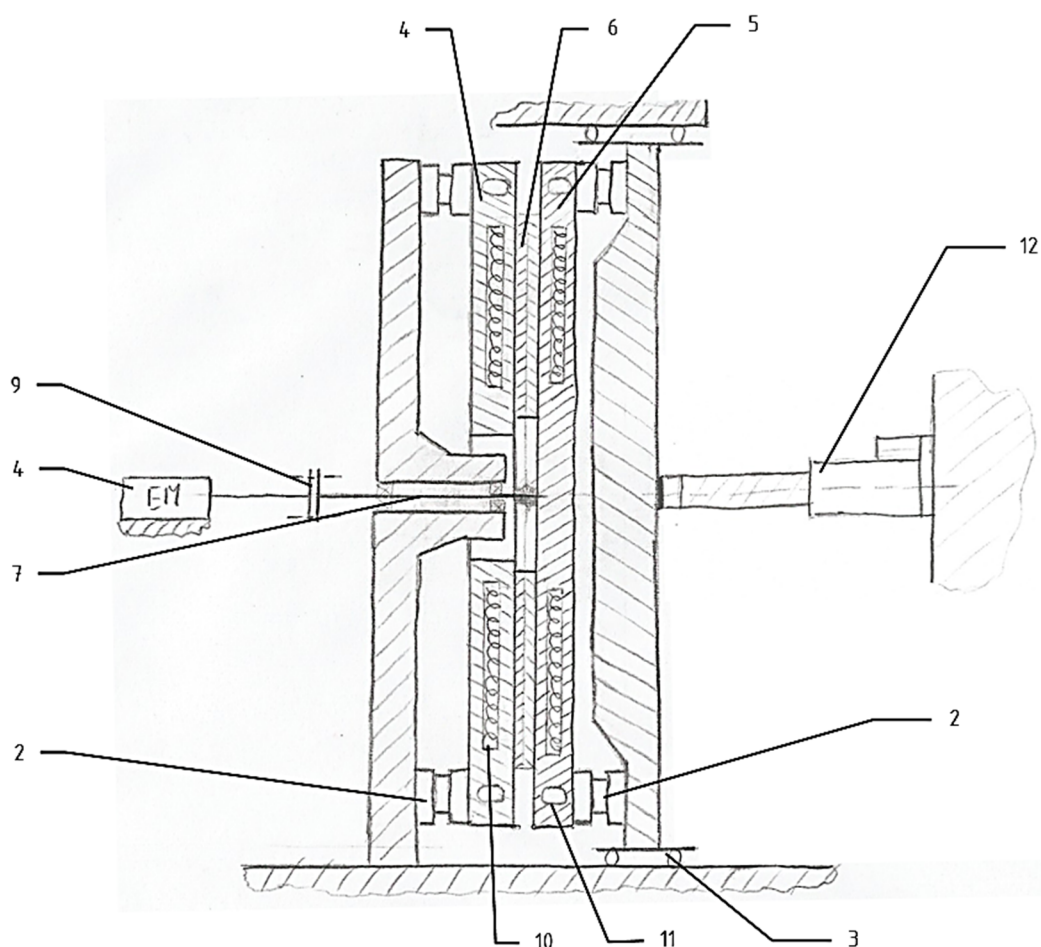


1-Hidraulički cilindar, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za hlađenje

Slika 41. Koncept 8

Elektromotor (8) preko vrtila (7) pokreće tarnu ploču spojke (6). Hidraulički cilindri (1) ostvaruju potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na jednoliko po obodu raspoređena tri višeosna senzora sile (2). Reakcijski članovi (4) i (5) izvedeni su kao pomični članovi te su preko senzora (2) fiksirani za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.2.2. Koncept 9



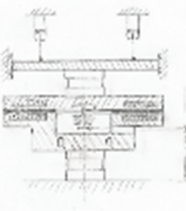
1-Hidraulički cilindar, 2-višeosni senzor sile, 3-vodilice, 4-reakcijski član I, 5-reakcijski član II, 6-tanjur spojke, 7-vratilo, 8-elektromotor, 9-spojka, 10-elektrootporni grijač, 11-kanali za Hlađenje, 12-Elektro-mehanički aktuator

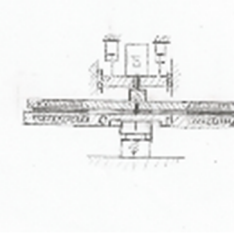
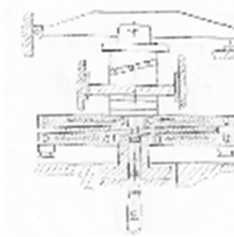
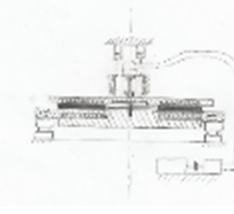
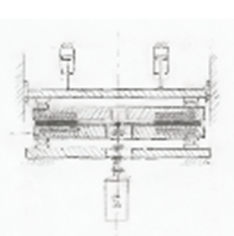
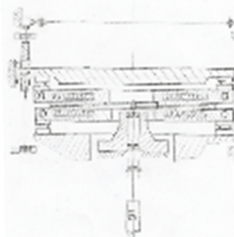
Slika 42. Koncept 9

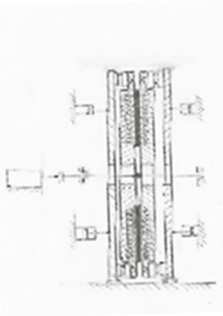
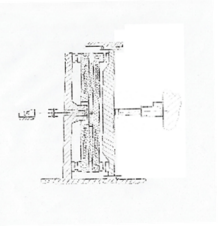
Elektromotor (8) preko vratila (7) pokreće tarnu ploču spojke (6). Elektromehanički aktuator (1) ostvaruje potrebnu normalnu silu pri čemu se trenjem moment s tarne ploče (6) prenosi na reakcijske članove (4) i (5) te sukladno tome na jednoliko po obodu raspoređena tri višeosna senzora sile (2). Reakcijski članovi (4) i (5) izvedeni su kao pomični članovi te su preko senzora (2) fiksirani za vodilice (3). Na taj način omogućeno je ostvarivanje potrebne normalne sile te otvaranje uređaja kako bi se izvršila izmjena tarne ploče spojke za iduće ispitivanje. Zagrijavanje reakcijskih članova ostvareno je elektrootpornim grijačima (10), a hlađenje senzora vrši se strujanjem rashladne tekućine kroz kanal za hlađenje (11).

### 5.3. Vrednovanje koncepata

Vrednovanje koncepata izvest će se s po sljedećim kriterijima: senzor, trošenje (jednostrano/obostrano), smještaj, izbacivanje čestica te mehanizam zatvaranja. Kriterij pod nazivom „Senzor“ obuhvaća pogodnost izvedbe senzora s obzirom na krutost cijelog postava pri čemu se izvedbe s više cirkularno raspoređenih senzora smatraju stabilnije i vrednuje se sa (+). Kriterij „Trošenje“ obuhvaća pogodnost trošenja tarne ploče spojke pri čemu se pozitivnim smatra obostrano trošenje zbog toga što takav slučaj odgovara onome koji se pojavljuje u spojkama te se vrednuje sa (+). Kriterij „Smještaj“ opisuje mogućnost smještaja uređaja u prostorijski. Uređaji s vertikalnom osi rotacije smatraju se pogodniji za smještaj zbog njihovog boljeg iskorištavanja prostora unutar prostorije u koju se smještaju te se vrednuju sa (++). Kriterij „Izbacivanje čestica“ opisuje mogućnost izbacivanja čestica nastalih trošenjem tarne ploče spojke pri čemu se koncepti s horizontalnom osi rotacije i rotirajućom taranom pločom vrednuju s (++). Izbacivanje čestica nužno je kako bi se eliminirao njihov utjecaj na rezultate mjerenja. Kriterij „Mehanizam zatvaranja“ opisuje jednostavnost mehanizma zatvaranja pri čemu su mehanizmi zatvaranja s jednim vretenom zbog svoje jednostavnosti i pouzdanosti vrednovani sa (++). Rezultati vrednovanja prikazani su u [Tablica 1].

	Koncept	Senzor	Trošenje (jednostrano /obostrano)	Smještaj	Izbacivanje čestica	Meh. zatvaranja	$\Sigma$
1		-	+	++	+	+	+4
2		-	+	++	+	+	+4

3		-	-	++	-	+	0
4		-/+	+	++	+	-	+3
5		+	-	++	-	+	2
6		+	+	++	+	+	+6
7		+	+	++	+	+	+6

8		+	+	+	++	+	+6
9		+	+	+	++	++	+7

Tablica 1. Vrednovanje koncepata

Vrednovanjem koncepata utvrđeno je kako koncept 9 predstavlja najveći potencijal za daljnju konstrukcijsku razradu. Prednost navedenog koncepta jest povoljan razmještaj senzora, obostrano trošenje tarne ploče koja rotira oko horizontalne osi što omogućuje adekvatno izbacivanje čestica. Ovaj koncept također omogućuje pogodniji smještaj uređaja zbog manje ugradbene visine nego što bi to bio slučaj kod uređaja s rotacijom tarne ploče oko vertikalne osi. Mehanizam zatvaranja s elektromehaničkim aktuatorom jest jednostavne izvedbe koja omogućava dovoljan hod otvaranja za promjenu ispitnog uzorka te omogućuje jednostavnu ugradnju opruge za kompenzaciju vibracija. Hidraulički te pneumatski aktuatori koji su bili ponuđeni kao potencijalno rješenje pridonose kompleksnosti strojeva zbog toga što je za njihovo upravljanje potrebno konstruirati čitav sustav koji sadrži ventile, cijevi, regulatore te kompresor ili pumpu. Iz tog razloga takva tehnička rješenja nisu uzeta u obzir.

## 6. Konstrukcijska razrada

### 6.1. Raspon vrijednosti normalne sile

Kako bismo odabrali senzor, aktuator te oprugu potrebno je proračunati raspon iznosa normalne sile koji se javlja tokom ispitivanja. Raspon normalne sile određuje se za ispitivanje tarne ploče spojke maksimalnog i minimalnog nominalnog momenta te gornjeg i donjeg raspona vrijednosti dinamičkog faktora trenja tarnih materijala.

Slučaj	Nominalni okretni moment spojke	Unutarnji promjer	Vanjski promjer	Faktor trenja klizanja (min)
1	$T_{\max} = 400 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 300 \text{ mm}$	$\mu_{\min} = 0,2$
2	$T_{\min} = 100 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 200 \text{ mm}$	
3	$T_{\max} = 400 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 300 \text{ mm}$	$\mu_{\max} = 0,5$
4	$T_{\min} = 100 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 200 \text{ mm}$	

**Tablica 2. Slučajevi ispitivanja**

Prema [8] izraz za normalnu silu na taru ploču spojke potrebnu da se prenese nominalni moment spojke glasi

$$F_N = \frac{T}{\mu \cdot r_m \cdot 2}, \quad (6.1)$$

gdje faktor 2 dolazi od dvije tarne plohe tarne ploče spojke.

Prema [8] dodatak s izrazima, izraz za srednji radijus glasi

$$r_m = \frac{2}{3} \left( \frac{r_v^3 - r_u^3}{r_v^2 - r_u^2} \right), \quad (6.2)$$

gdje je  $r_u = \frac{d_u}{2}$  te  $r_v = \frac{d_v}{2}$ .

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 2] za slučaj 1 u izraze (6.1) te (6.2) dobivamo:

$$r_{u_1} = \frac{d_u}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ mm}, \quad (6.3)$$

$$r_{v_1} = \frac{d_v}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}, \quad (6.4)$$

$$r_{m_1} = \frac{2}{3} \left( \frac{r_{v_1}^3 - r_{u_1}^3}{r_{v_1}^2 - r_{u_1}^2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{150^3 - 75^3}{150^2 - 75^2} \right) = 116,67 \text{ mm}, \quad (6.5)$$

$$F_{N_1} = \frac{T_{\max}}{\mu_{\min} \cdot r_{m_1} \cdot 2} = \frac{400 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 116,67 \cdot 2} = 8572 \text{ N}. \quad (6.6)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 2] za slučaj 2 u izraze (6.1) te (6.2) dobivamo:

$$r_{u_2} = \frac{d_u}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ mm}, \quad (6.7)$$

$$r_{v_2} = \frac{d_v}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}, \quad (6.8)$$

$$r_{m_2} = \frac{2}{3} \left( \frac{r_{v_2}^3 - r_{u_2}^3}{r_{v_2}^2 - r_{u_2}^2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{100^3 - 75^3}{100^2 - 75^2} \right) = 88 \text{ mm}, \quad (6.9)$$

$$F_{N_2} = \frac{T_{\min}}{\mu_{\min} \cdot r_{m_2} \cdot 2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,2 \cdot 88 \cdot 2} = 2841 \text{ N}. \quad (6.10)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 2] za slučaj 3 u izraze (6.1) te (6.2) dobivamo:

$$r_{u_3} = \frac{d_u}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ mm}, \quad (6.11)$$

$$r_{v_3} = \frac{d_v}{2} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}, \quad (6.12)$$

$$r_{m_3} = \frac{2}{3} \left( \frac{r_{v_3}^3 - r_{u_3}^3}{r_{v_3}^2 - r_{u_3}^2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{150^3 - 75^3}{150^2 - 75^2} \right) = 116,67 \text{ mm}, \quad (6.13)$$

$$F_{N_3} = \frac{T_{\max}}{\mu_{\max} \cdot r_{m_3} \cdot 2} = \frac{400 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 116,67 \cdot 2} = 3429 \text{ N}. \quad (6.14)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 2] za slučaj 4 u izraze (6.1) te (6.2) dobivamo:

$$r_{u_4} = \frac{d_u}{2} = \frac{150}{2} = 75 \text{ mm}, \quad (6.15)$$

$$r_{v_4} = \frac{d_v}{2} = \frac{200}{2} = 100 \text{ mm}, \quad (6.16)$$

$$r_{m_4} = \frac{2}{3} \left( \frac{r_{v_2}^3 - r_{u_2}^3}{r_{v_2}^2 - r_{u_2}^2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{100^3 - 75^3}{100^2 - 75^2} \right) = 88 \text{ mm}, \quad (6.17)$$

$$F_{N_4} = \frac{T_{\min}}{\mu_{\max} \cdot r_{m_4} \cdot 2} = \frac{100 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 88 \cdot 2} = 1136 \text{ N}. \quad (6.18)$$

Dobivene vrijednosti za normalne sile za pojedine slučajeve prikazane su u [Tablica 3]. Iz navedene tablice Sada možemo očitati minimalnu i maksimalnu vrijednost raspona normalne sile  $F_{N_{\min}} = F_{N_4} = 1136 \text{ N}$  te  $F_{N_{\max}} = F_{N_1} = 8562 \text{ N}$ .

Slučaj	Nominalni okretni moment spojke	Unutarnji promjer	Vanjski promjer	Faktor trenja klizanja (min)	Normalna sila
1	$T_{\max} = 400 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 300 \text{ mm}$	$\mu_{\min} = 0,2$	$F_{N_1} = 8562 \text{ N}$
2	$T_{\min} = 100 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 200 \text{ mm}$		$F_{N_2} = 2841 \text{ N}$
3	$T_{\max} = 400 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 300 \text{ mm}$	$\mu_{\max} = 0,5$	$F_{N_3} = 3429 \text{ N}$
4	$T_{\min} = 100 \text{ Nm}$	$d_u = 150 \text{ mm}$	$d_v = 200 \text{ mm}$		$F_{N_4} = 1136 \text{ N}$

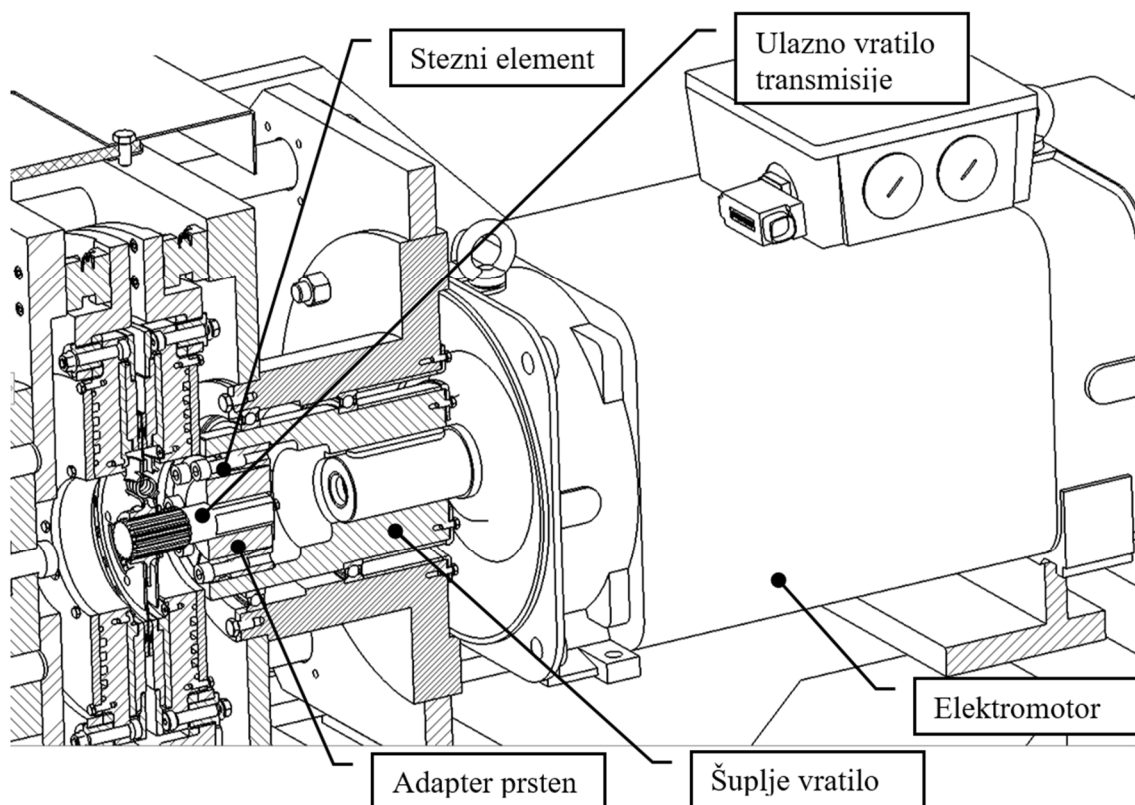
**Tablica 3. Raspon vrijednosti normalne sile**

## 6.2. Reaktivni član

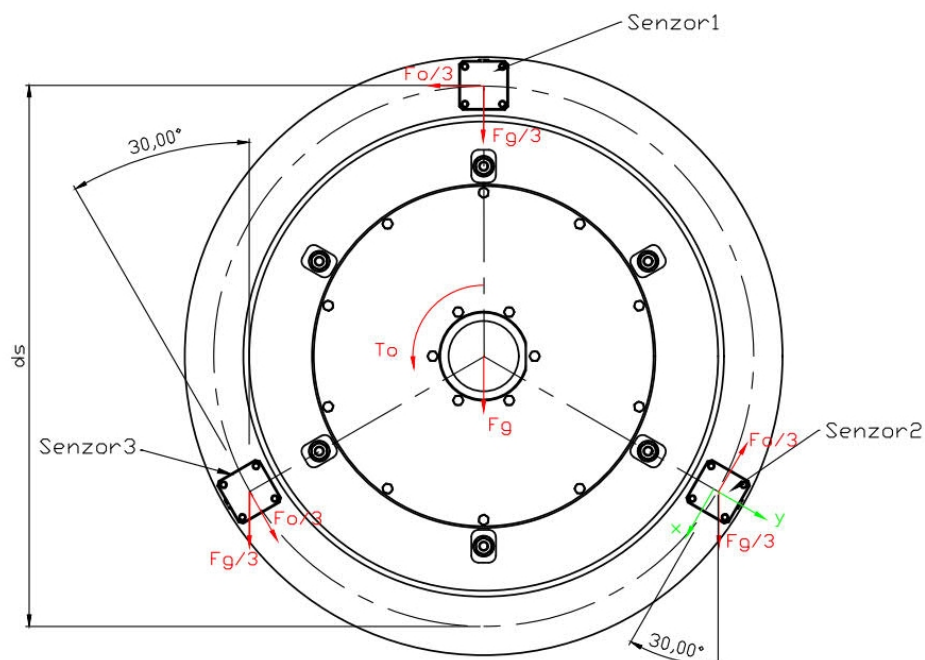
### 6.2.1. Proračun i odabir senzora

Reaktivni član povezan je za nosače preko tri jednoliko po obodu smještena senzora [Slika 43]. Senzori prenose opterećenje uzrokovano okretnim momentom koji se sa spojke prenosi na reaktivne članove te opterećenje uslijed vlastite težine reaktivnih članova [Slika 44].





Slika 43. Smještaj senzora reakcijskih sklopova u stroju



Slika 44. Opterećenja na senzore

Prema [Slika 44] određuju se opterećenja za pojedine senzore 1, 2, 3 s obzirom na njihov referentni koordinatni sustav x,y,z .

## 6.2.1.1. Senzor 1

Opterećenje senzora 1 u aksijalnom smjeru određuje se s obzirom na maksimalnu normalnu silu  $F_{N_{\max}}$  te iznosi

$$F_{y1} = \frac{F_{N_{\max}} \cdot S}{3} = \frac{8562 \cdot 1,5}{3} = 4281 \text{ N} , \quad (6.19)$$

gdje je  $S$  faktor sigurnosti. Obodna sila  $F_o$  određuje se iz maksimalnog momenta pri čemu u idealnom slučaju svaki reaktivni član prenosi  $T_o = \frac{T_{\max}}{2}$ . Uvrštavanjem u izraz dobivamo

$$T_o = \frac{T_{\max} \cdot S}{2} = \frac{400 \cdot 1,5}{2} = 300 \text{ Nm} , \quad (6.20)$$

gdje je  $S$  faktor sigurnosti. Iz jednakosti

$$F_o = \frac{T_o}{r_s} , \quad (6.21)$$

gdje je  $d_s = 458 \text{ mm}$  parametra iz konstrukcije, odnosno  $r_s = \frac{d_s}{2} = \frac{458}{2} = 229 \text{ mm}$  slijedi

$$F_o = \frac{T_o}{r_s} = \frac{300 \cdot 10^3}{229} = 1310 \text{ N} . \quad (6.22)$$

Komponenta sile  $F_{x1}$  iznosi

$$F_{x1} = \frac{F_o}{3} = \frac{1310}{3} = 437 \text{ N} . \quad (6.23)$$

Komponenta sile  $F_{y1}$  iznosi

$$F_{y1} = \frac{F_G}{3} , \quad (6.24)$$

gdje je  $F_G$  sila uslijed mase reaktivnog člana  $m_g = 60 \text{ kg}$  koja je iz konstrukcije. Sila  $F_G$  iznosi

$$F_G = m_g \cdot g = 60 \cdot 10 = 600 \text{ N} . \quad (6.25)$$

Sada imamo

$$F_{y1} = \frac{F_G}{3} = \frac{600}{3} = 200 \text{ N} . \quad (6.26)$$

## 6.2.1.2. Senzor 2

Opterećenje senzora 2 u aksijalnom smjeru određuje se s obzirom na maksimalnu normalnu silu  $F_{N_{\max}}$  te iznosi

$$F_{y2} = \frac{F_{N_{\max}} \cdot S}{3} = \frac{8562 \cdot 1,5}{3} = 4281 \text{ N} . \quad (6.27)$$

Komponenta sile  $F_{x_1}$  iznosi

$$F_{x_1} = \frac{F_o}{3} + \frac{F_G}{3} \cdot \cos(30^\circ) = \frac{1310}{3} + \frac{600}{3} \cdot \cos(30^\circ) = 610 \text{ N} . \quad (6.28)$$

Komponenta sile  $F_{y_1}$  iznosi

$$F_{y_1} = \frac{F_G}{3} \cdot \sin(30^\circ) = \frac{600}{3} \cdot \sin(30^\circ) = -100 \text{ N} . \quad (6.29)$$

## 6.2.1.3. Senzor 3

Opterećenje senzora 3 u aksijalnom smjeru određuje se s obzirom na maksimalnu normalnu silu  $F_{N_{\max}}$  te iznosi

$$F_{y3} = \frac{F_{N_{\max}} \cdot S}{3} = \frac{8562 \cdot 1,5}{3} = 4281 \text{ N} . \quad (6.30)$$

Komponenta sile  $F_{x_1}$  iznosi

$$F_{x_1} = \frac{F_o}{3} - \frac{F_G}{3} \cdot \cos(30^\circ) = \frac{1310}{3} - \frac{600}{3} \cdot \cos(30^\circ) = 264 \text{ N} . \quad (6.31)$$

Komponenta sile  $F_{y_1}$  iznosi

$$F_{y_1} = \frac{F_G}{3} \cdot \sin(30^\circ) = \frac{600}{3} \cdot \sin(30^\circ) = 100 \text{ N} . \quad (6.32)$$

Dobiveni iznosi sila po pojedinom senzoru prikazani su u [Tablica 4].

	$F_x$ [N]	$F_y$ [N]	$F_z$ [N]
Senzor 1	437	200	4281
Senzor 2	610	-100	4281
Senzor 3	264	100	4281

**Tablica 4. Opterećenje senzora**

S obzirom na maksimalne vrijednosti sile za pojedinu os odabran je višeosni aksijalni piezoelektrični senzor oznake 9327 C proizvođača Kistler. Iz tehničkih podataka senzora [Slika 45] vidljivo je kako su maksimalne sile iz [Tablica 4] višestruko manje od dopuštenih vrijednosti kada se senzori vežu na zajedničku krutu plohu.

## Force



## 3-Component Quartz Force Link

Typ 9327C

42x42x42 mm, -8 ... 8 kN

Quartz force links are able to measure the three perpendicular components of a dynamic or quasistatic force in any direction.

- Precise measurement regardless of the acting point of the force
- Large useable frequency range
- Compact size
- Rust free and sealed sensor case
- Plug connection via robust multipole connector

## Description

The 3-component force sensor is mounted under preload between two mounting flanges. The quartz force link can therefore measure compression and tensile forces.

The force measurement of the sensor is based on the piezoelectric principle. The application of a force results in the quartz washers in the sensor (one for each of the force components to be measured) yielding a charge proportional to the force. This is picked off by built-in electrodes and transferred to the corresponding connector.

The contact faces of the sensor are covered with ceramic discs to facilitate ground-isolated mounting of the sensor. The straightforward and vibration-resistant design of the sensor produces a very rigid structure. The resulting high natural frequency makes highly dynamic force measurements possible over a large frequency range.

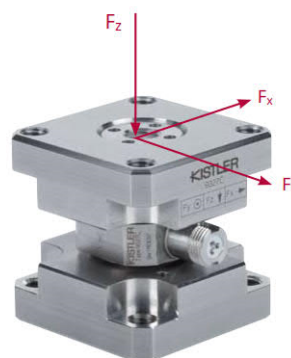
The cable connection of the sensors is made via a 3-pole connector V3 neg. (design patented). This is provided with a positioning aid for simple centering that also protects the plug and receptacle connector against unintended rotation.

After correct mounting the sensor is immediately ready for use without recalibration.

## Application

Kistler 3-component quartz force links measure simply, directly and precisely. They are used in the measurement of:

- Cutting forces in metal cutting processes
- Collision forces in crash tests
- Recoil forces of rocket motors
- Vibration and friction forces
- Ground reaction forces in biomechanics
- Vehicle forces on the road and test bed
- Forces on wind tunnel balances



## Technical Data

Range	$F_x, F_y$	kN	-4 ... 4
(without moment loading, e.g. if four measuring elements are mounted on a platform)			
Range	$F_x, F_y$	kN	-1 ... 1
(example with force application point of the cover plate surface)			
Range	$F_z$	kN	-8 ... 8
(central force application point)			
Overload	$F_x, F_y, F_z$	%	20
Calibrated range	$F_x, F_y$	kN	0 ... 1
(force application point 8 mm below cover plate surface)			
Calibrated range	$F_z$	kN	0 ... 8
(central force application point)			
Permissible moment loading	$M_x, M_y$	N-m	-22/22
$(M_z = 0; F_z = 0)$			
Permissible moment loading	$M_z$	N-m	-23/23
$(M_{x,y} = 0, F_z = 0)$			
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	$F_x, F_y$	pC/N	≈-7,8
	$F_z$	pC/N	≈-3,8

9327C\_000-7725e-03.10

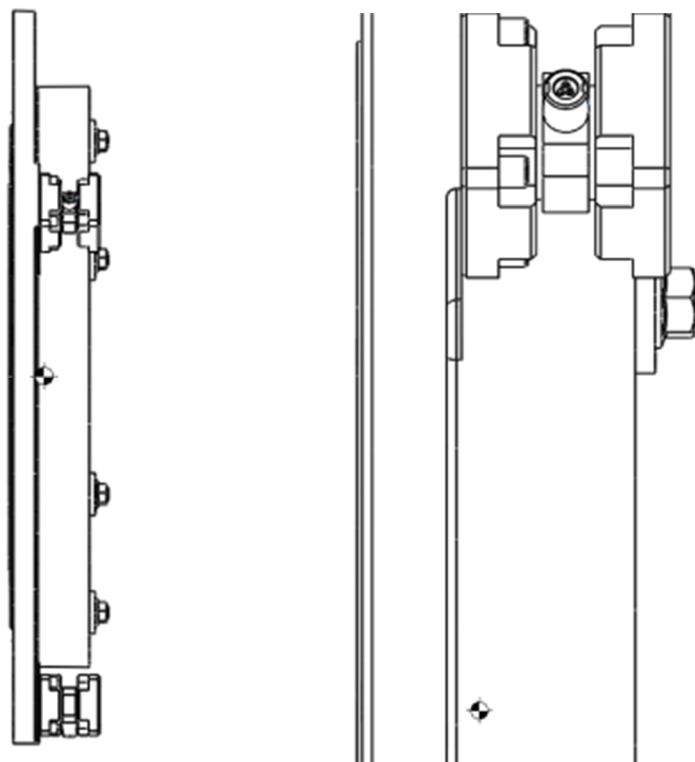
Page 1/4

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com  
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

Slika 45. Tehnički podaci senzora

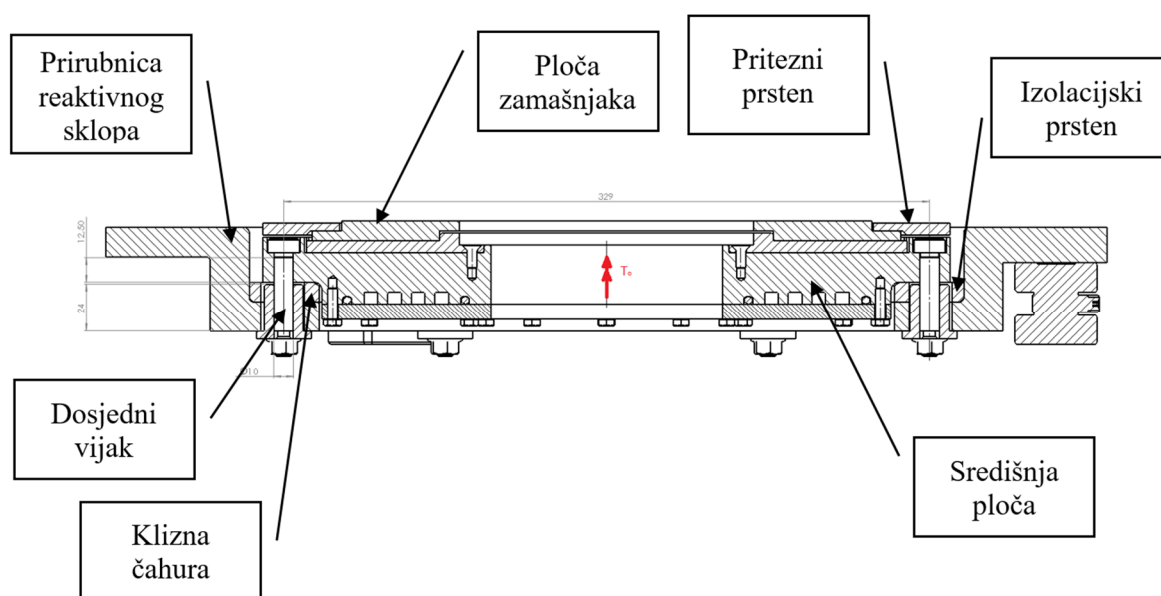
Centar mase reaktivnog elementa njegovim adekvatnim oblikovanjem pomaknut je iza kontaktne površine senzora i prirubnice kako bi senzori bili povoljnije opterećeni [Slika 46].



Slika 46. Težište reaktivnog elementa

#### 6.2.2. Proračun sile stezanja te dosjednih vijaka

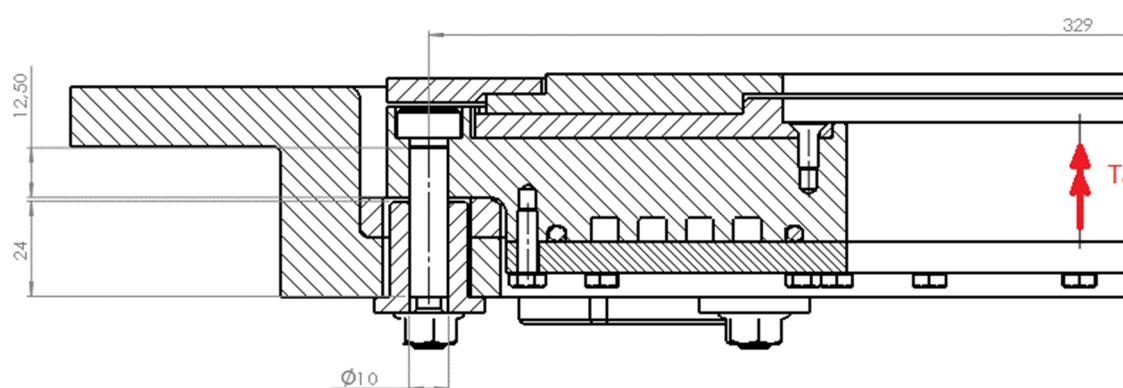
Dio momenta s tarne ploče prenosi se na jedan te drugi sklop reaktivnog elementa. Navedeni moment prenosi se s ploče zamašnjaka na središnju ploču, zatim preko dosjednih vijaka na kliznu čahuru, zatim prirubnicu reaktivnog sklopa te potom na senzore koji su pričvršćeni za prirubnicu. Dosjedni vijci spojeni su kliznim čahurama smještenima u radijalno izduženim provrtima prirubnice reaktivnog sklopa kako bi se uslijed različite brzine zagrijavanja središnje ploče i prirubnice ograničila pojava toplinskih naprezanja koja bi mogla uzrokovati neželjene deformacije. Spajanje čahurama također omogućuje ubacivanje izolacijskog prstena između središnje ploče i prirubnice reaktivnog sklopa koji je potreban kako bi se smanjio toplinski tok na senzore [Slika 47].



Slika 47. Izvedba sklopa reaktivnog elementa

#### 6.2.2.1. Proračun dosjednih vijaka

Kako bi se prenio okretni moment sa središnje ploče na prirubnicu reaktivnog sklopa potrebno je provjeriti zadovoljavaju li dosjedni vijci. Proračun se provodi za dimenzije vijka ISO 7376 10x40 prema [Slika 48] te ulazne parametre [Tablica 5].



Slika 48. Dimenzije dosjednog vijka

Ulazni Parametri	Oznaka/Iznos parametra
Promjer vijka	$d_v = 10 \text{ mm}$

Promjer rasporeda vijaka	$D = 329 \text{ mm}$
Broj vijaka	$i = 6$
Najmanja dužina naljezanja	$s = 12,5 \text{ mm}$
Maksimalni moment prema (6.20)	$T_o = 300 \text{ Nm}$

**Tablica 5. Ulazni parametri dosjednog vijka**

Površina presjeka tijela vijka iznosi;

$$A = \frac{d_v^2 \cdot \pi}{4} = \frac{10^2 \cdot \pi}{4} = 78,54 \text{ mm}^2. \quad (6.33)$$

Smična sila na vijak izračunava se prema izrazu iz [8] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz [Tablica 5] iznosi ;

$$F_Q = \frac{T_o}{i \cdot \frac{D}{2}} = \frac{300 \cdot 10^3}{6 \cdot \frac{329}{2}} = 304 \text{ N} . \quad (6.34)$$

Smično naprezanje izračunava se prema izrazu iz [8] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz [Tablica 5] i iznosa  $F_Q$  iznosi;

$$\tau_s = \frac{F_Q}{A} = \frac{304}{78,54} = 3,87 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (6.35)$$

Površinski pritisak izračunava se prema izrazu iz [8] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz [Tablica 5] i iznosa  $F_Q$  iznosi;

$$\sigma_1 = \frac{F_Q}{d_v \cdot s} = \frac{304}{10 \cdot 12,5} = 2,432 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (6.36)$$

Prema [18] Tab 10.14 i Tab 10.2 Iznos dopuštenog smičnog naprezanja dosjednog vijka za istosmjerno opterećenje iznosi;

$$\tau_{s \text{ dop}} = 0,5 \cdot R_e, \quad (6.37)$$

a dopušteni površinski pritisak;

$$\sigma_{1 \text{ dop}} = 0,9 \cdot R_e . \quad (6.38)$$

Prema Tab 10.2 za kvalitetu vijka 12.9 granica tečenja iznosi  $R_e = 1080 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Iz toga slijedi



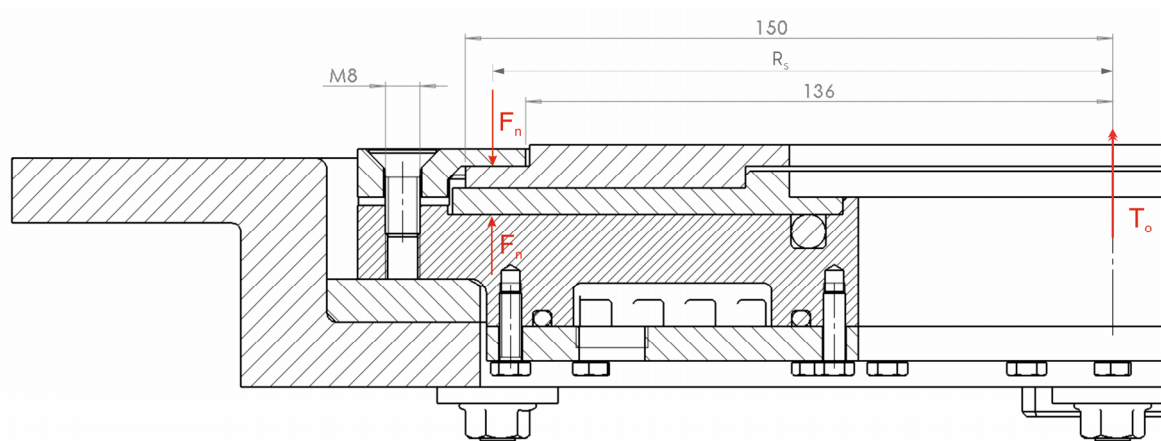
$$\tau_{s\ dop} = 0,5 \cdot 1080 = 540 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \quad (6.39)$$

$$\sigma_{l\ dop} = 0,9 \cdot 1080 = 972 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}. \quad (6.40)$$

Vijci zadovoljavaju.

#### 6.2.2.2. Proračun sile stezanja

Kako bi se prenio okretni moment trenjem sa zamašnjaka na središnju ploču reaktivnog sklopa potrebno je ostvariti dovoljnu normalnu silu. Proračun se provodi za vijak M8 slučaj opterećenja sa [Slika 49] te vrijednosti parametara iz [Tablica 6]



Slika 49. Dimenzije za proračun sile stezanja

Ulazni parametri	Oznaka/Iznos parametra
Vanjski radijus površine nalijeganja	$R_v = 150 \text{ mm}$
Unutarnji radijus površine nalijeganja	$R_u = 136 \text{ mm}$
Maksimalni moment prema (6.20)	$T_o = 300 \text{ Nm}$
Faktor trenja čelik/čelik prema [18]	$\mu = 0,15$
Broj vijaka	$i = 6$
Faktor sigurnosti prijanjanja prema [18]	$S_H = 1,5$
Broj tarnih površina	$m = 3$

Tablica 6. Ulazni parametri za proračun sile pritezanja

Srednji radijus djelovanja sile trenja izračunava se prema izrazu iz [18] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz iznosi [Tablica 6]

$$R_{Sr} = \frac{2}{3} \left( \frac{R_v^3 - R_u^3}{R_v^2 - R_u^2} \right) = \frac{2}{3} \left( \frac{150^3 - 136^3}{150^2 - 136^2} \right) = 143,12 \text{ mm} . \quad (6.41)$$

Obodna sila po vijku izračunava se izrazu iz [18] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz [Tablica 6] iznosi

$$F_Q = \frac{T_o}{i \cdot R_{Sr}} = \frac{300 \cdot 10^3}{6 \cdot 143,12} = 349,4 \text{ N} . \quad (6.42)$$

Sila u vijku izračunava se izrazu iz [18] te nakon uvrštavanja vrijednosti iz [Tablica 6] iznosi

$$F_V = \frac{S_H \cdot F_Q}{\mu \cdot m} = \frac{1,5 \cdot 349,4}{0,15 \cdot 3} = 1165 \text{ N} . \quad (6.43)$$

Minimalna sila prednaprezanja mora pokriti eventualne gubitke sjedanja spojeva pa se potrebna sila prednaprezanja uvećava za procijenjeni gubitak uslijed sjedanja spoja  $F_Z = 3 \text{ kN}$  te sada iznosi

$$F_{M_{\min}} = F_V + F_Z = 1165 + 3000 = 4165 \text{ N} . \quad (6.44)$$

Uzimajući u obzir faktor pritezanja moment ključem  $\alpha_A = 1,6$  prema [18] Tab 10.6 potrebna sila prednaprezanja sada iznosi

$$F_{M_{\max}} = F_{M_{\min}} \cdot \alpha_A = 4165 \cdot 1,6 = 6664 \text{ N} . \quad (6.45)$$

Prema [18] Tab 10.8 Vrijednost dopuštene sile prednaprezanja za vijak M8 kvalitete 8.8 te faktora trenja u navoju  $\mu_G = 0,12$  iznosi

$$F_{M_{\text{dop}}} = 17200 \text{ N} . \quad (6.46)$$

Vijci zadovoljavaju.

### 6.2.2.3. Proračun hlađenja

Potrebno je projektirati sustav hlađenja vodom tako da se omogući adekvatno hlađenje reaktivnih članova. Reaktivni članovi zagrijevaju se uslijed klizanja tarne ploče o reaktivne plohe. Kako bi se omogućilo zadržavanje željene temperature odnosno spriječilo pregrijavanje cijelog sustava, hlađenje mora biti dimenzionirano tako da može odvesti kompletan iznos

disipirane snage uslijed trenja klizanja. Kako bismo bili na strani sigurnosti zanemareni su toplinski tokovi uslijed konvekcije, zračenja te provođenja na ostale komponente koji dodatno pospješuju hlađenje odvođenjem topline. Iz toga slijedi da je maksimalni teoretski toplinski tok koji je potrebno odvesti hlađenjem

$$\phi_{hl} = P_{trenja} = \mu \cdot F_{Nmax} \cdot v_{max} , \quad (6.47)$$

gdje je  $\mu$  faktor trenja klizanja,  $F_{Nmax}$  maksimalna normalna sila te  $v_{max}$  maksimalna brzina klizanja. Maksimalni maseni protok vode potreban za hlađenje dobivamo iz izraza

$$q_m = \frac{\phi_{hl}}{c_w \cdot (T_{iz} - T_{ul})} , \quad (6.48)$$

gdje je  $c_w$  toplinski kapacitet vode,  $T_{iz}$  izlazna temperatura vode u K te  $T_{ul}$  ulazna temperatura vode u K. Volumenski protok dobivamo iz izraza

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_v} , \quad (6.49)$$

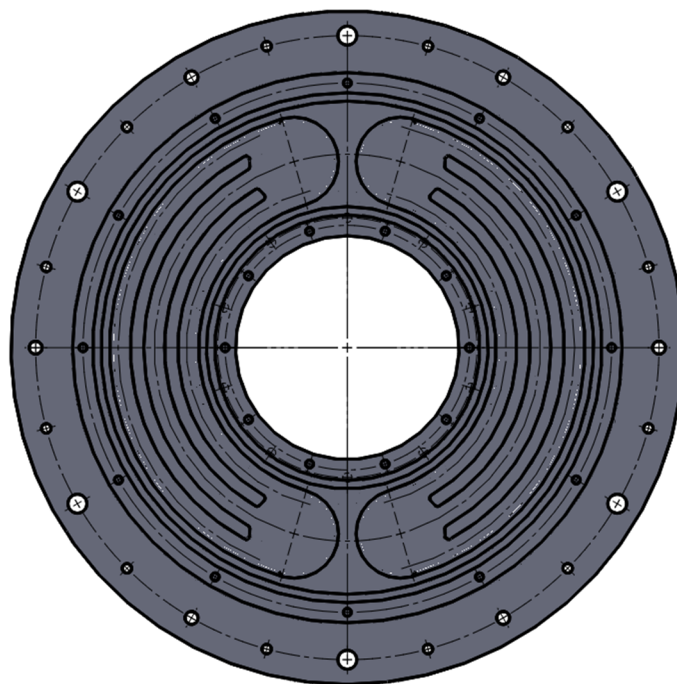
gdje je  $q_m$  maseni protok vode, a  $\rho_{v45}$  gustoća vode. Brzinu strujanja vode dobivamo iz izraza

$$v_s = \frac{q_v}{A_0} = \frac{q_v}{n \cdot h \cdot b} , \quad (6.50)$$

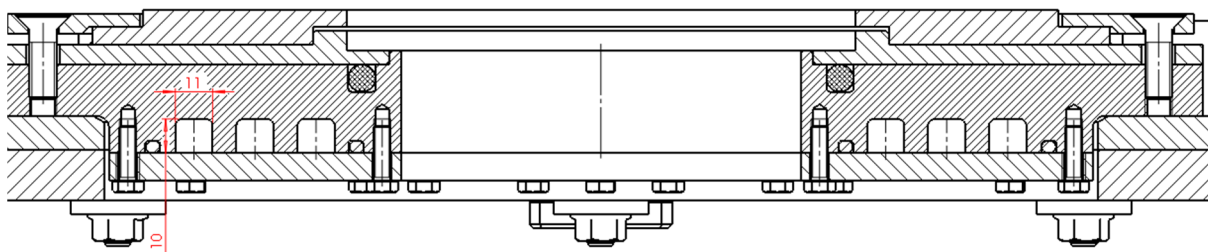
gdje je površina presjeka kanala za hlađenje  $A_0$  dobivena množenjem broja kanal  $n$  te dimenzija kanala  $b$  i  $h$ . Proračun se provodi za ulazne parametre navedene u [Tablica 7] te izvedbu kanala [Slika 50] i dimenzije rashladnih kanala prikazanih na [Slika 51].

Maksimalna normalna sila prema [Tablica 3]	$F_{Nmax} = 8562 \text{ N}$
Faktor trenja klizanja [Slika 12]	$\mu = 0,4$
Maksimalan brzina klizanja pri ispitivanju tarnih materijala	$v = 20 \text{ m/s}$
Radius djelovanja sile trenja za najveću spojku izraz (6.5)	$r = r_{m1} = 116,67 \text{ mm}$
Ulazna temperatura vode	$g_{ul} = 83 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Izlazna temperatura vode	$g_{iz} = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Specifični toplinski kapacitet vode $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]	$c_{w86,5} = 4,2001 \text{ kJ/kg K}$
Gustoća vode $65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [20]	$\rho_{v86,5} = 968,62 \text{ kg/m}^3$

**Tablica 7. Parametri za proračun hlađenja**



Slika 50. Izvedba kanala za hlađenje



Slika 51. Dimenzije rashladnih kanala

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 7] u izraz (6.47) dobivamo toplinski tok koji treba odvesti hlađenjem pri

$$\phi_{hl} = P_{trena} = \mu \cdot F_{N_{max}} \cdot v_{max} = 0,4 \cdot 8562 \cdot 20 = 68496 \text{ W} . \quad (6.51)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 7] u izraz (6.48) dobivamo maseni protok koji treba ostvariti hlađenjem

$$q_m = \frac{\phi_{hl}}{c_{w65} \cdot (T_{iz} - T_{ul})} = \frac{68496}{4200,1 \cdot (363,15 - 356,15)} = 2,33 \frac{\text{kg}}{\text{s}}. \quad (6.52)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 7] u izraz (6.49) dobivamo volumenski protok koji treba ostvariti

$$q_v = \frac{q_m}{\rho_{v65}} = \frac{2,33}{968,62} = 2,45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 2,4 \frac{\text{l}}{\text{s}}. \quad (6.53)$$

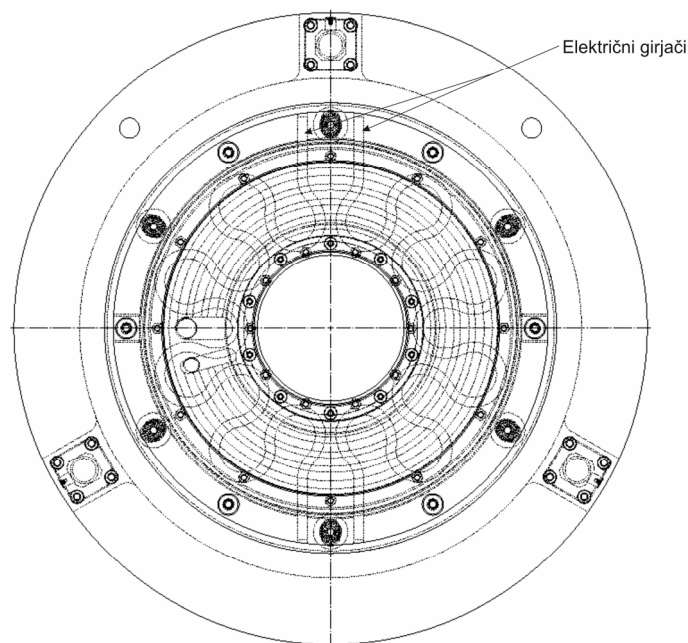
Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 7] u izraz (6.50) dobivamo brzinu strujanja

$$v_s = \frac{q_v}{A_0} = \frac{q_v}{n \cdot h \cdot b} = \frac{2,45 \cdot 10^{-3}}{6 \cdot 0,010 \cdot 0,011} = 3,71 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (6.54)$$

Vrijednost volumenskog protoka dobivenu u (6.53) moguće je ostvariti vodenom pumpom koja se koristi za hlađenje motora s unutarnjim izgaranjem. [36]

#### 6.2.2.4. Proračun elektrootpornog grijača

Elektrootproni grijač mora biti tako dimenzioniran da omogući zagrijavanje središnjeg dijela sklopa reaktivnog elementa do 320 °C. Dužina elektrootpornog grijača koji se može smjestiti u reaktivni element ograničena je smještajem ostalih komponenti unutar sklopa reaktivnog elementa te dopuštenim radijusima savijanja cijevi grijača. Smještaj elektrootpronihih grijača prikazan je na [Slika 52].



**Slika 52. Smještaj elektrootpronihih grijača**

Snaga potrebna da se masa središnjeg dijela reaktivnog elementa zagrije na traženu temperaturu izračunava se iz izraza [22]

$$P = \frac{Q}{t} = \frac{c_{\text{čelika}} \cdot m_{\text{reaktivnog}} \cdot (T_2 - T_1)}{t} \quad (6.55)$$

gdje je  $c$  specifični toplinski kapacitet,  $m$  zagrijavana masa,  $T_1$  početna temperatura,  $T_2$  tražena temperatura i  $t$  vrijeme zagrijavanja.

Struja koja protječe grijačem izračunava se iz izraza prema [22]

$$I = \frac{P}{U} \quad (6.56)$$

gdje je  $U$  napon mreže. Potreban otpor elektrootpornog vodiča dobiva se iz izraza prema [22]

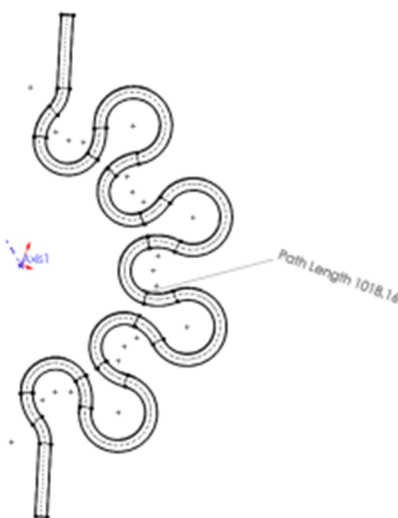
$$R = \frac{U^2}{P} \quad (6.57)$$

Potrebna gustoća toplinskog toka elektrootprnog grijača dobiva se iz izraza prema [23]

$$q = \frac{P}{\pi \cdot d_{\text{grijača}} \cdot l_{\text{grijača}}} \quad (6.58)$$

gdje je  $l_{\text{grijača}}$  dužina elektrootpornog grijača, a  $d_{\text{grijača}}$  promjer elektrootpornog grijača.

Za proračun je važan iznos dužine elektrootprnog grijača prikazana na [Slika 53].



Slika 53. Dužina putanje elektrootpornog grijača

Proračun se provodi s obzirom na poznate parametre iz konstrukcije navedene u [Tablica 8]

Masa središnjeg dijela reaktivnog elementa (sve osim prirubnice reaktivnog elementa)	$m_{reaktivnog} = 28 \text{ kg}$
Početna temperatura	$\vartheta_s = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Maksimalna temperatura prilikom ispitivanja	$\vartheta_{radno} = 320 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Specifični toplinski kapacitet čelika [20]	$c_{\text{čelika}} = 461 \text{ J/kg K}$
Napon mreže	$U = 220 \text{ V}$
Dužina grijača	$l = 2020 \text{ mm}$
Promjer cijevi grijača	$d_{grijača} = 8 \text{ mm}$
Vrijeme zagrijavanja	$t = 10 \text{ min}$

**Tablica 8. Parametri za proračun elektrootpornih grijača**

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 8] u izraz (6.55) dobivamo snagu elektrootpornog grijača

$$P = \frac{461 \cdot 28 \cdot (593,15 - 293,15)}{10 \cdot 60} = 6454 \text{ W} . \quad (6.59)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 8] u izraz (6.56) dobivamo struju koja protječe elektrootpornim grijačem

$$I = \frac{P}{U} = \frac{6454}{220} = 29,33 \text{ A} . \quad (6.60)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 8] u izraz (6.58) dobivamo potreban otpor elektrootpornog grijača

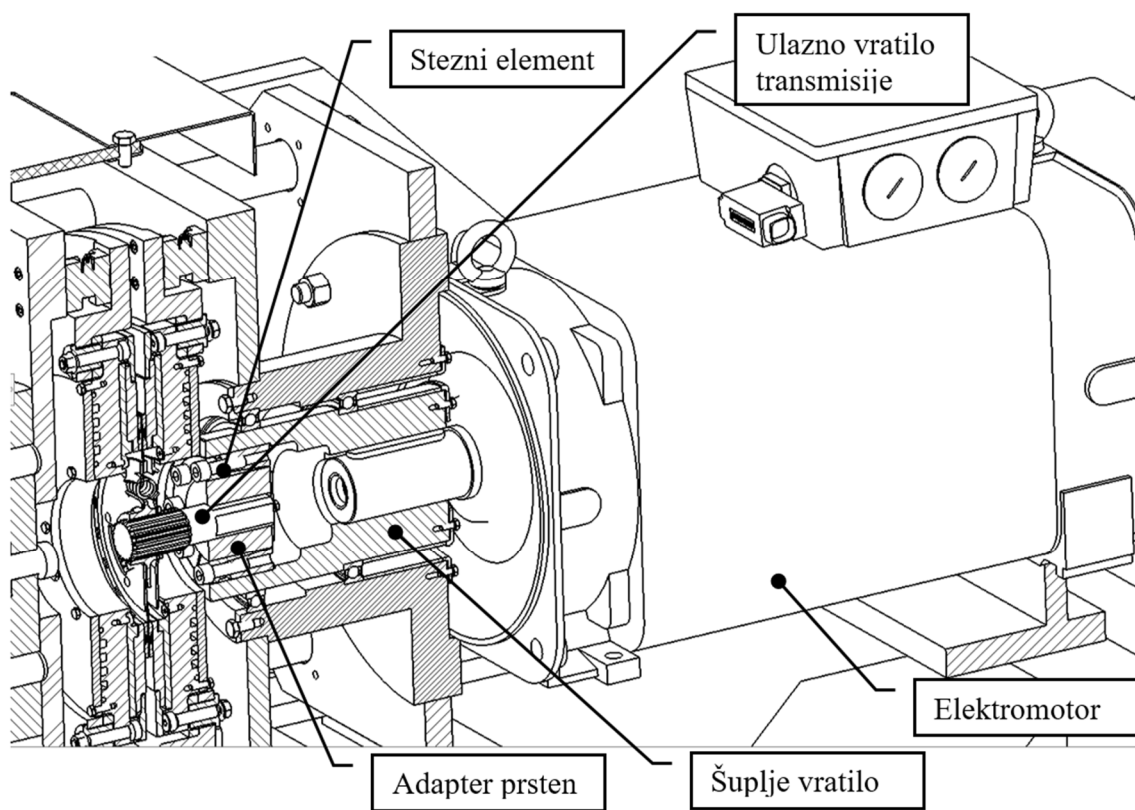
$$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{6454} = 7,5 \text{ } \Omega . \quad (6.61)$$

Uvrštavanjem vrijednosti iz [Tablica 8] u izraz (6.58) dobivamo potrebnu gustoću toplinskog toka elektrootpornog grijača

$$q = \frac{P}{\pi \cdot d_{grijača} \cdot l_{grijača}} = \frac{6454}{3,14 \cdot 0,008 \cdot 2020,0} = 12,72 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} . \quad (6.62)$$

### 6.3. Pogonski sklop

Pogonski sklop uređaja za ispitivanje automobilske suhe spojke [Slika 54] ima ulogu stvaranja i prenošenja okretnog momenta do tarne ploče spojke pri čemu se mora osigurati prilagodljivost pogonskog sklopa različitim veličinama tarnih ploči spojke. Kako svaka tarna ploča ima različitu dimenziju ulaznog vratila transmisije, prilagodljivost različitim veličinama spojki ostvaruje se steznim elementom i adapter prstenom. Ulazno vratilo transmisije izrezuje se iz transmisije kod koje se koristi ispitivani uzorak tarne ploče spojke te stražnji dio vratila oblikuje u P4C profil. Adapter prsten izrađuje se zasebno za svaki uzorak pri čemu se veličina unutarnjeg P4C utora izrađuje s obzirom na veličinu vratila koje je potrebno prihvatiti. Vanjski promjer prstena ostaje isti kako bi se omogućilo stezanje istim steznim elementom.



Slika 54. Izvedba pogonskog sklopa

#### 6.3.1. Odabir elektromotora

Potrebno je odabrati servo elektromotor koji ispunjava projektne zahtjeve (kratkotrajni okretni moment 400 Nm te najveća brzina vrtnje 3000 okr/min). Pregledom prije faze koncipiranja utvrđeno je kako servo elektromotori proizvođača SIEMENS serije 1FT6 oznaka 1FT6163-8SD7 te 1FT6163-8WD7 ispunjavaju tražene projektne zahtjeve. S obzirom da elektromotor



1FT6163-8WD7 ima izvedeno hlađenje vodom, a razlika između dvaju motora po pitanju njihovih performansi je minimalna. Odabire se elektromotor 1FT6163-8SD7 s dodatnim

ventilatorom za hlađenje kako bi se smanjila kompleksnost cijelog stroja. Dimenzije motora prikazane su na [Slika 56], a dijagram motora na [Slika 55].

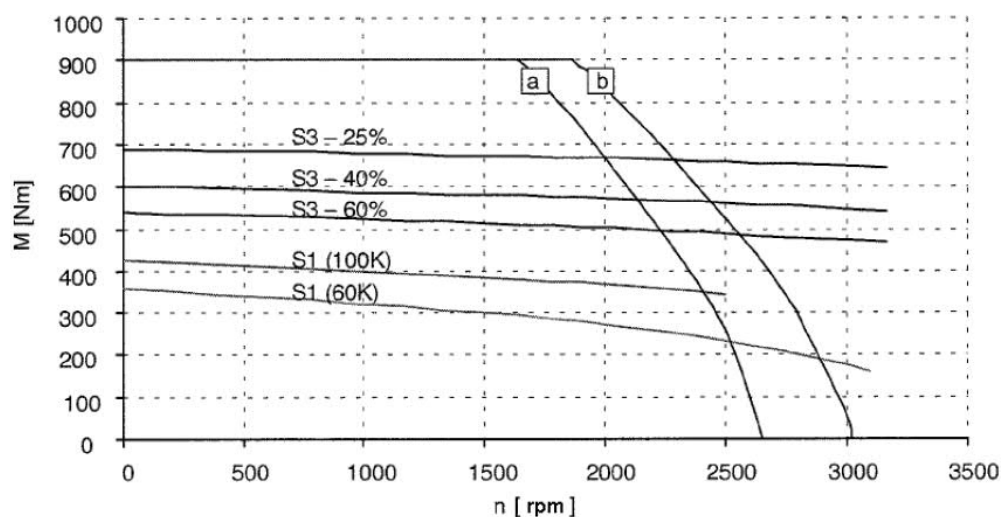


Fig. 3-76 Speed-torque diagram 1FT6163-8SD7

- [a] MASTERDRIVES MC,  $V_{DC \text{ link}} = 540 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{Mot} = 340 \text{ V}_{rms}$
- [b] MASTERDRIVES MC (AFE),  $V_{DC \text{ link}} = 600 \text{ V (DC)}$ ,  $V_{mot} = 380 \text{ V}_{rms}$

**Slika 55. Dijagram odabranog elektromotora 1FT6163-8SD7**

## Dimension Drawings

## Force ventilated 1FT6 motors

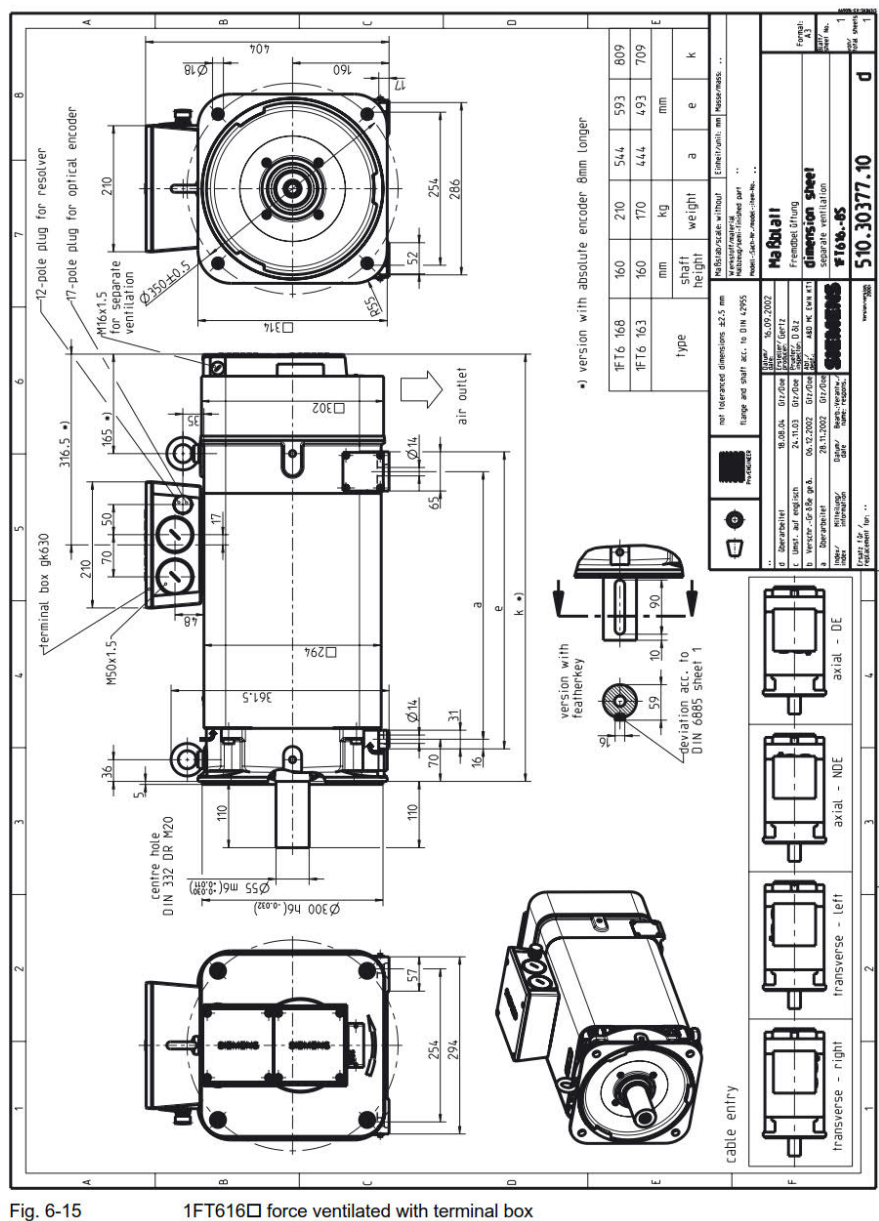


Fig. 6-15 1FT616□ force ventilated with terminal box

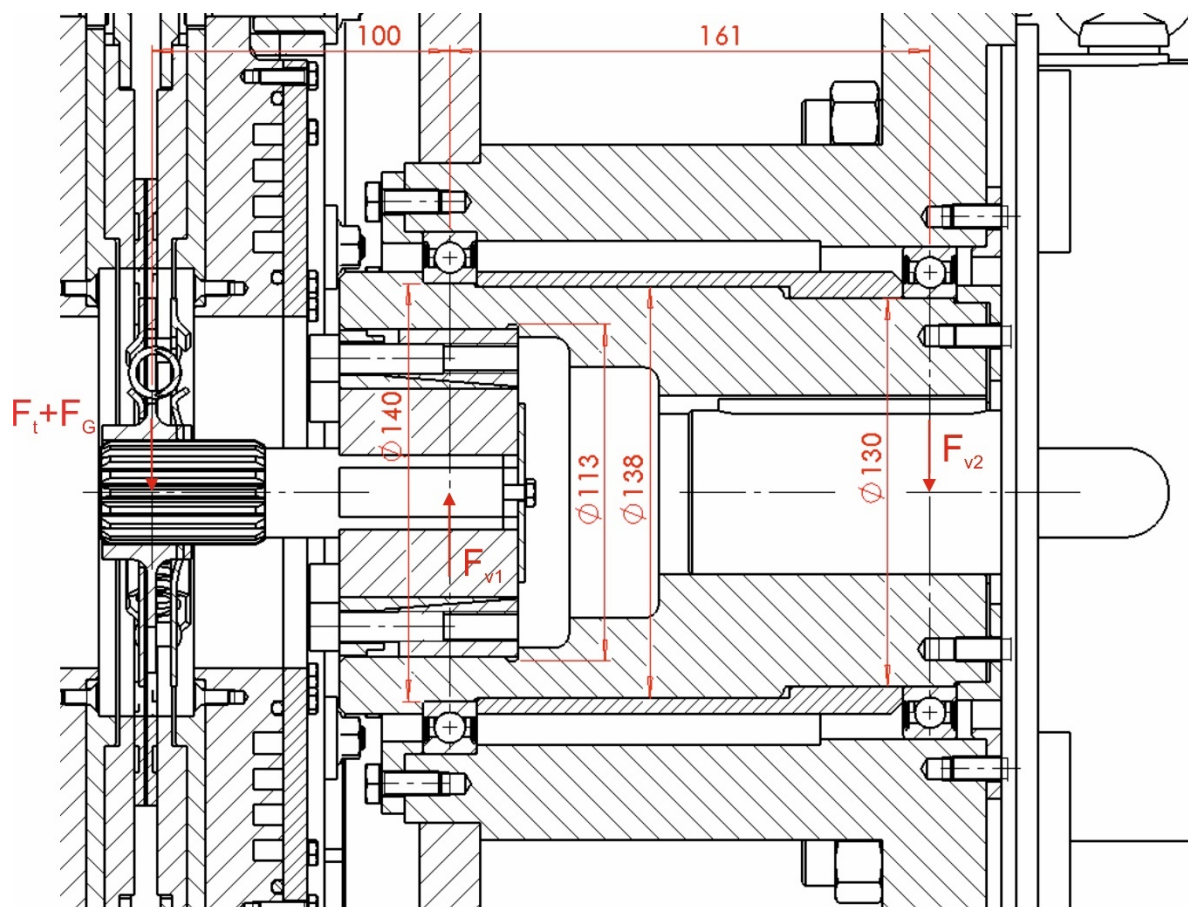
6-16

1FT6 Synchronous Motors  
Configuration Manual, (PFT6), 10.2005 Edition, 6SN1197-0AD02-0BP1

Slika 56. Dimenzije odabranog motora 1FT6163-8SD7

### 6.3.2. Proračun elemenata pogona

Potrebno je provjeriti naprezanja šupljeg vratila te provesti odabir ležaja za dimenzije komponenti prikazane na [Slika 57]. Za opterećenje je uzet najgori mogući slučaj kada imamo puni iznos obodne sile te ga reduciramo na vratilo. U realnoj primjeni ovakav slučaj se vrlo vjerojatno neće pojaviti jer se tarva ploča spojke stišće sa obje strane cijelom površinom što dovodi do umanjivanja sile koja se reducira na vratilo.



Slika 57. Dimenzije i opterećenja pogonskog sklopa

Iznos obodne sile dobivamo iz izraza

$$F_t = \frac{T_{\max \text{ motora}}}{r_{m \text{ spojke}}} . \quad (6.63)$$

Kako je maksimalni traženi okretni moment  $T_{\max \text{ motora}} = 400 \text{ Nm}$  zadan zadatkom, a srednji radijus za najveću tarvu ploču spojke  $r_{m \text{ spojke}} = 116,67 \text{ mm}$  izračunat u izrazu (4.3), uvrštavanjem njihovih vrijednosti u prethodni izraz dobivamo iznos obodne sile

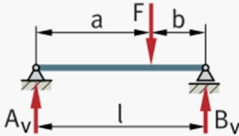
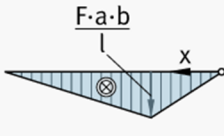
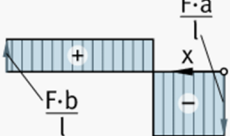
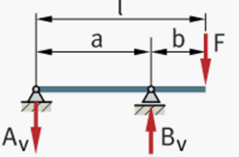
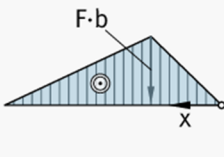
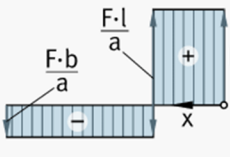
$$F_t = \frac{T_{\max \text{ motora}}}{r_{m \text{ spojke}}} = \frac{400 \cdot 10^3}{116,67} = 3428 \text{ N} . \quad (6.64)$$

Iz zakonitosti mehanike dobivamo izraz za iznos sila u osloncima:

$$\begin{aligned}\sum M_A &= 0 \\ (F_G + F_t) \cdot b - F_{V2} \cdot a &= 0, \\ F_{V2} &= (F_G + F_t) \cdot \frac{b}{a}\end{aligned}\quad (6.65)$$

$$\begin{aligned}\sum M_B &= 0 \\ (F_G + F_t) \cdot (a + b) - F_{V1} \cdot a &= 0, \\ F_{V1} &= (F_G + F_t) \cdot \frac{a + b}{a}\end{aligned}\quad (6.66)$$

Navedeni izrazi odgovaraju izrazima za gredu opterećenu silom na kraju s prepustom na osloncu A prema [24] što je prikazano na [Slika 58].

System	Bearing reactions	Bending moment distribution	Transverse force distribution
	$A_v = F \cdot \frac{b}{l}$ $B_v = F \cdot \frac{a}{l}$		
	$A_v = F \cdot \frac{b}{a}$ $B_v = F \cdot \frac{l}{a}$		

Continuation of table, see Page 242.

**Slika 58. Analitičko rješenje za gredu opterećenu silom na kraju s prepustom na osloncu A**

Uvrštavanjem poznatih parametara;  $F_G = 50 \text{ N}$ ,  $F_t = 3428 \text{ N}$ ,  $b = 100 \text{ mm}$ ,  $a = 161 \text{ mm}$  u izraze (6.65), (6.66) dobivamo reakcije u osloncima;

$$F_{V2} = (F_G + F_t) \cdot \frac{b}{a} = (50 + 3428) \cdot \frac{100}{161} = 2160 \text{ N}, \quad (6.67)$$

$$F_{V1} = (F_G + F_t) \cdot \frac{a + b}{a} = (50 + 3428) \cdot \frac{161 + 100}{161} = 5638 \text{ N}. \quad (6.68)$$

### 6.3.2.1. Provjera naprezanja šupljeg vratila te provjera odabranih ležaja

Sada provjeravamo naprezanje u šupljem vratilu na prvom kritičnom presjeku koji se nalazi na prvom osloncu gdje je promjera  $D = 140$  mm te unutarnji promjer  $d = 110$  mm. Prema [22] izraz za torzijski moment otpora šupljeg vratila glasi

$$W_t = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} . \quad (6.69)$$

Sada uvrštavanjem dobivamo

$$W_t = \frac{\pi}{16} \cdot \frac{140^4 - 110^4}{140} = 333444 \text{ mm}^3 . \quad (6.70)$$

Prema [22] izraz za moment otpora šupljeg vratila glasi

$$W_x = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{D^4 - d^4}{D} . \quad (6.71)$$

Sada uvrštavanjem zadanih promjera dobivamo

$$W_x = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{140^4 - 110^4}{140} = 166722 \text{ mm}^3 . \quad (6.72)$$

Prema [22] izraz za naprezanje uslijed torzije glasi

$$\tau_t = \frac{M_t}{W_t} = \frac{T_{\max \text{ motora}}}{W_t} . \quad (6.73)$$

Sada uvrštavanjem vrijednosti dobivamo

$$\tau_t = \frac{400 \cdot 10^3}{333444} = 1,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (6.74)$$

Prema [22] izraz za naprezanje uslijed savijanja glasi

$$\sigma_f = \frac{M_f}{W_x} = \frac{(F_G + F_t) \cdot b}{W_x} . \quad (6.75)$$

Sada uvrštavanjem vrijednosti dobivamo

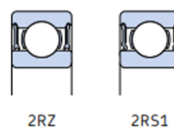
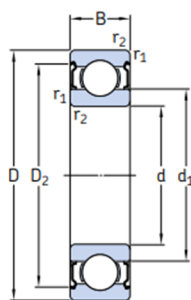
$$\sigma_f = \frac{3478 \cdot 100}{166722} = 2,1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (6.76)$$

Iz dobivenih iznosa naprezanja vidljivo je kako su naprezanja vrlo malog iznosa što znači da će i iznos reduciranog naprezanja također biti malen te puno manji od dopuštenog naprezanja za

materijal S355  $\sigma_{f_{DN}} = 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  [25]. Iz navedenog nije potrebno provjeravati naprezanje na sekundarnom kritičnom presjeku gdje je unutarnji promjer vratila povećan na  $d = 113 \text{ mm}$  kako bi se omogućilo pravilnije sjedanje steznog elementa.

S obzirom na izračunate sile reakcije u osloncima potrebno je provjeriti životni vijek odabranih ležaja. Na mjestu djelovanja sile  $F_{V1}$  odabran je kuglični ležaj 61828-2RZ, a na mjestu djelovanja sile  $F_{V2}$  kuglični ležaj oznake 61826-2RZ. Podaci odabranih ležaja prema [26] prikazani su na [Slika 59].

### 1.2 Capped single row deep groove ball bearings d 120 – 160 mm



22

Principal dimensions			Basic load ratings		Fatigue load limit	Speed ratings		Mass	Designations	
d	D	B	C	C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Reference speed	Limiting speed <sup>1)</sup>	kg	Bearing capped on both sides	one side
mm			kN		kN	r/min			–	
120	150	16	29,1	28	1,29	8 500	4 300	0,65	61824-2RZ	–
	150	16	29,1	28	1,29	–	2 400	0,65	61824-2RS1	–
	180	28	88,4	80	2,75	7 500	3 800	2,2	* 6024-2Z	* 6024-Z
	180	28	88,4	80	2,75	–	2 200	2,15	* 6024-2RS1	* 6024-RS1
	215	40	146	118	3,9	6 300	3 200	5,35	6224-2Z	6224-Z
	215	40	146	118	3,9	–	1 900	5,3	6224-2RS1	6224-RS1
	260	55	208	186	5,7	5 600	2 800	12,7	6324-2Z	6324-Z
	260	55	208	186	5,7	–	1 700	12,6	6324-2RS1	6324-RS1
	165	18	37,7	43	1,6	8 000	3 800	0,93	61826-2RZ	–
	165	18	37,7	43	1,6	–	2 200	0,93	61826-2RS1	–
130	200	33	112	100	3,35	7 000	3 400	3,35	* 6026-2Z	* 6026-Z
	200	33	112	100	3,35	–	2 000	3,35	* 6026-2RS1	* 6026-RS1
	230	40	156	132	4,15	5 600	3 000	6	6226-2Z	6226-Z
	230	40	156	132	4,15	–	1 800	5,9	6226-2RS1	6226-RS1
	175	18	39	46,5	1,66	7 500	3 600	0,99	61828-2RZ	–
140	175	18	39	46,5	1,66	–	2 000	0,99	61828-2RS1	–
	210	33	111	108	3,45	6 700	3 200	3,6	6028-2Z	6028-Z
	210	33	111	108	3,45	–	1 800	3,55	6028-2RS1	6028-RS1
150	225	35	125	125	3,9	6 000	3 000	4,35	6030-2Z	6030-Z
	225	35	125	125	3,9	–	1 700	4,35	6030-2RS1	6030-RS1
160	240	38	143	143	4,3	5 600	2 800	5,35	6032-2Z	6032-Z
	240	38	143	143	4,3	–	1 600	5,3	6032-2RS1	6032-RS1

Slika 59. Tehnički podaci odabranih kugličnih ležajeva [26]

Ležajno mjesto na kojem je smješten kuglični ležaj 61828-2RZ izvedeno je kao slobodno. Iz navedenog razloga ležaj je opterećen samo radijalnom silom. Prema [26] izraz za nazivni vijek trajanja ležaja glasi

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \cdot \left( \frac{C}{P} \right)^\varepsilon . \quad (6.77)$$

Za samo radijalno opterećen ležaj vrijedi  $P = F_r = F_{V1}$ . Za kuglični ležaj  $\varepsilon = 3$ . Uvrštavanjem iznosa sile  $F_{V1}$  te ostalih tehničkih podataka za ležaj 61828-2RZ sa [Slika 59] za projektnu brzinu vrtnje  $n = 3000$  okr/min u izraz (6.77) imamo

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 3000} \cdot \left( \frac{39 \cdot 10^3}{5638} \right)^3 = 1839 \text{ h} . \quad (6.78)$$

Ležajno mjesto na kojem je smješten kuglični ležaj 61826-2RZ preuzima neznatan dio aksijalne sile kako velik dio aksijalne sile preuzima reaktivni sklop. Iz navedenog razloga uzima se da je ležaj opterećen samo radijalnom silom. Za samo radijalno opterećen ležaj vrijedi  $P = F_r = F_{V2}$ . Za kuglični ležaj  $\varepsilon = 3$ . Uvrštavanjem iznosa sile  $F_{V2}$  te ostalih tehničkih podataka za ležaj 61826-2RZ sa [Slika 59] za projektnu brzinu vrtnje  $n = 3000$  okr/min u izraz (6.77) imamo

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot 3000} \cdot \left( \frac{37,7 \cdot 10^3}{2160} \right)^3 = 29538 \text{ h} . \quad (6.79)$$

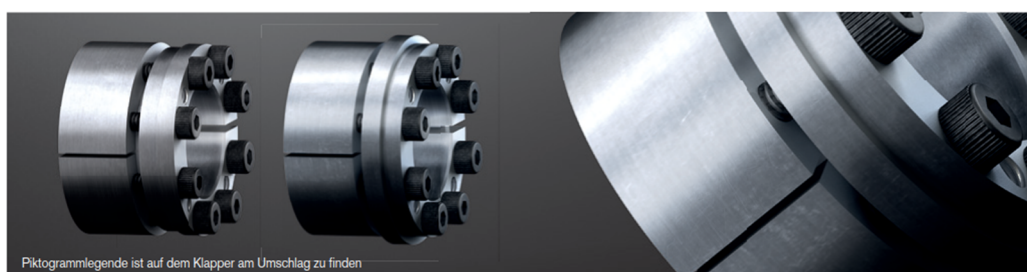
Kako je riječ o ispitnom uređaju, a opterećenja koja će se pojaviti daleko manja od u proračunu uzetih opterećenja, može se očekivati kako će životni vijek ležaja biti znatno duži od izračunatog.

### 6.3.2.2. Odabir steznog elementa

Stezni element potrebno je odabrati s obzirom na maksimalni okretni moment  $T_{\max \text{ motora}} = 400 \text{ Nm}$  te konstrukcijska prostorna ograničenja. S obzirom na navedena ograničenja odabran je stezni element CLAMPEX KTR 200 proizvođača KTR. Na [Slika 60] prikazana je izvedba steznog elementa, a na [Slika 61] prikazani su tehnički podaci odabranog steznog elementa.

## CLAMPEX® KTR 200 und KTR 201 Spannelemente

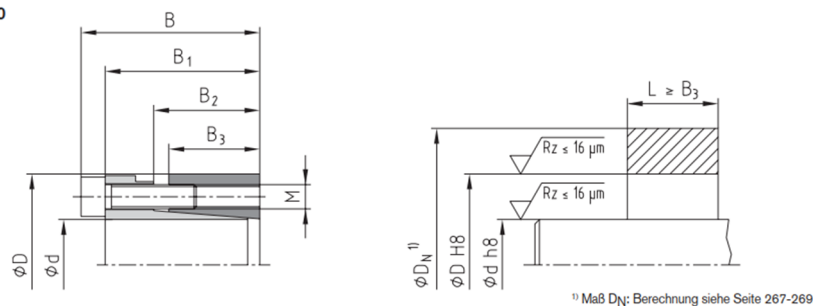
Selbstzentrierende Spannelemente mit breitem Anwendungsspektrum



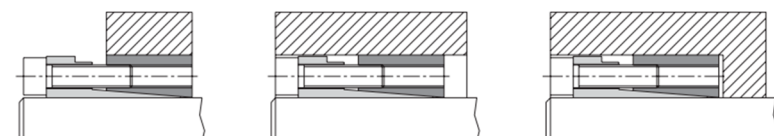
Piktogrammlegende ist auf dem Klapper am Umschlag zu finden



KTR 200



Anwendungsbeispiel Nabenform



Slika 60. Izvedba odabranog steznog elementa



## CLAMPEX® KTR 200 und KTR 201 Spannelemente

CLAMPEX® – KTR 200 und KTR 201																
d x D [mm]	Abmessungen [mm]					Spannschrauben DIN EN ISO 4762 - 12.9 $\mu_{ges.}=0,14$					KTR 200					
											Übertragbares Drehmoment oder Axialkraft		Flächenpressung zwischen Spann- element		Gewicht [-kg]	Lagerprogramm
	B	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	M	Länge	z Anzahl	T <sub>A</sub> [Nm] <sup>1)</sup> KTR 200	KTR 201	T [Nm]	F <sub>ax</sub> [kN]	Welle PW [N/mm <sup>2</sup> ]	Nabe PN [N/mm <sup>2</sup> ]		
20 x 47	48	42	31	26	53	M6	25	6	17	17	530	53	270	115	0,4	●
22 x 47	48	42	31	26	53	M6	25	6	17	17	580	53	245	114	0,4	●
24 x 50	48	42	31	26	56	M6	25	6	17	17	630	53	223	107	0,4	●
25 x 50	48	42	31	26	56	M6	25	6	17	17	660	53	215	108	0,4	●
28 x 55	48	42	31	26	61	M6	25	6	17	17	740	53	193	98	0,5	●
30 x 55	48	42	31	26	61	M6	25	6	17	17	790	53	179	98	0,5	●
32 x 60	48	42	31	26	66	M6	25	8	17	17	1150	72	229	122	0,6	●
35 x 60	48	42	31	26	66	M6	25	8	17	17	1300	74	217	126	0,5	●
38 x 65	48	42	31	26	71	M6	25	8	17	17	1300	68	184	107	0,6	●
40 x 65	48	42	31	26	71	M6	25	8	17	17	1400	70	179	110	0,6	●
42 x 75	59	51	35	30	81	M8	30	6	41	41	2000	95	200	112	1,0	●
45 x 75	59	51	35	30	81	M8	30	6	41	41	2200	98	192	115	1,0	●
48 x 80	59	51	35	30	86	M8	30	8	41	41	3200	133	246	147	1,1	●
50 x 80	59	51	35	30	86	M8	30	8	41	41	3300	132	233	146	1,1	●
55 x 85	59	51	35	30	91	M8	30	8	41	41	3600	131	210	136	1,2	●
60 x 90	59	51	35	30	96	M8	30	8	41	41	3900	130	192	128	1,2	●
65 x 95	59	51	35	30	101	M8	30	8	41	41	4300	132	180	123	1,3	●
70 x 110	71	61	46	40	119	M10	30	8	83	83	7500	214	203	129	2,2	●
75 x 115	71	61	46	40	124	M10	30	8	83	83	8000	213	189	123	2,3	●
80 x 120	71	61	46	40	129	M10	30	8	83	83	8500	213	176	117	2,4	●
85 x 125	71	61	46	40	134	M10	30	10	83	83	11400	268	209	142	2,6	●
90 x 130	71	61	46	40	139	M10	30	10	83	83	12000	267	196	136	2,7	●
95 x 135	71	61	46	40	144	M10	30	10	83	83	12600	265	185	130	2,8	●
100 x 145	80	68	52	45	155	M12	35	8	145	145	15000	300	177	122	3,9	●
110 x 155	80	68	52	45	165	M12	35	8	145	145	16500	300	161	114	4,2	●
120 x 165	80	68	52	45	175	M12	35	10	145	145	22500	375	184	134	4,5	●
130 x 180	80	68	52	45	188	M12	35	12	145	145	29000	446	202	146	5,5	●
140 x 190	90	76	58	50	199	M14	40	10	210	230	32000	457	173	128	6,6	●
150 x 200	90	76	58	50	209	M14	40	12	210	230	41000	547	193	145	6,9	●
160 x 210	90	76	58	50	219	M14	40	12	210	230	44000	550	182	139	7,4	●
170 x 225	90	76	58	50	234	M14	40	14	210	230	54500	641	200	151	8,6	●
180 x 235	90	76	58	50	244	M14	40	14	210	230	57500	639	188	144	9,1	●
190 x 250	90	76	58	50	259	M14	40	15	210	230	65000	684	191	145	10,6	●
200 x 260	90	76	58	50	269	M14	40	15	210	230	68000	680	180	139	11,2	●

● Spannelementgrößen ab Lager lieferbar.

<sup>1)</sup> Dies sind die maximalen Schraubenanzugsmomente. Sie können um max. 40% der o.g. Werte reduziert werden, wobei dann T, F<sub>ax</sub>, P<sub>W</sub>

Slika 61. Tehnički podaci odabranog steznog elementa

### 6.3.2.3. Provjera tlaka naležnih površina P4C profila adapter prstena

Potrebno je provjeriti tlak kontaktnih površina između adapter prstena i vratila za P4C profil.

Prema [18] izraz za tlak između naležnih površina glasi

$$p = \frac{T}{l_t \cdot (\pi \cdot d_r \cdot e_r + 0.05 \cdot d_r^2)} , \quad (6.80)$$

gdje je:  $T$  - preneseni okretni moment,  $l_t$  - nosiva dužina spoja,  $d_r = d_2 + 2e$  - proračunski promjer te  $e_r$  - ekscentricitet profila. Relevantne dimenzije P4C profila prikazane su na [Slika 62]

Tab. 12.10 Abmessungen in mm der Polygonprofile P3G und P4C

Polygonprofile P3G DIN 32711								Polygonprofile P4C DIN 32712							
$d_1$	$d_2$	$d_3$	$e_1$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$e_1$	$d_1$	$d_2$	$e$	$e_r$	$d_1$	$d_2$	$e$	$e_r$
14	14,88	13,12	0,44	50	53,6	46,4	1,8	14	11	1,6	0,75	50	43	6	1,75
16	17	15	0,5	55	59	51	2	16	13	2	0,75	55	48	6	1,75
18	19,12	16,88	0,56	60	64,5	55,5	2,25	18	15	2	0,75	60	53	6	1,75
20	21,26	18,74	0,63	65	69,9	60,1	2,45	20	17	3	0,75	65	58	6	1,75
22	23,4	20,6	0,7	70	75,6	64,4	2,8	22	18	3	1	70	60	6	2,5
25	26,6	23,4	0,8	75	81,3	68,7	3,15	25	21	5	1	75	65	6	2,5
28	29,8	26,2	0,9	80	86,7	73,3	3,35	28	24	5	1	80	70	8	2,5
30	32	28	1	85	92,1	77,9	3,55	30	25	5	1,25	85	75	8	2,5
32	34,24	29,76	1,12	90	98	82	4	32	27	5	1,25	90	80	8	2,5
35	37,5	32,5	1,25	95	103,5	86,5	4,25	35	30	5	1,25	95	85	8	2,5
40	42,8	37,2	1,4	100	109	91	4,5	40	35	6	1,25	100	90	8	2,5
45	48,2	41,8	1,6					45	40	6	1,25				

Bezeichnung eines Polygonwellen-Profiles P3G von  $d_1 = 40$  und  $d_2 = 42,8$  g6: Profil DIN 32711 – A P3G 40 g6  
 Bezeichnung eines Polygonnaben-Profiles P4C von  $d_1 = 40$  und  $d_2 = 35$  H7: Profil DIN 31712 – B P4C 40 H7

### Slika 62. Izmjere P4C profila

Provjera pritiska će se provesti za promjer vratila  $d_1 = 40$  mm za koje su izmjere P4C profila dane na [Slika 62], minimalnu dužinu spoja  $l_{t \min} = 35$  mm te okretni moment  $T_{\max \text{ motora}} = 400$  Nm. Uvrštavanjem vrijednosti dobivamo

$$d_r = d_2 + 2e = 35 + 2 \cdot 6 = 43 \text{ mm} , \quad (6.81)$$

$$p = \frac{400 \cdot 10^3}{35 \cdot (\pi \cdot 43 \cdot 1,25 + 0.05 \cdot 43^2)} = 43,74 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (6.82)$$

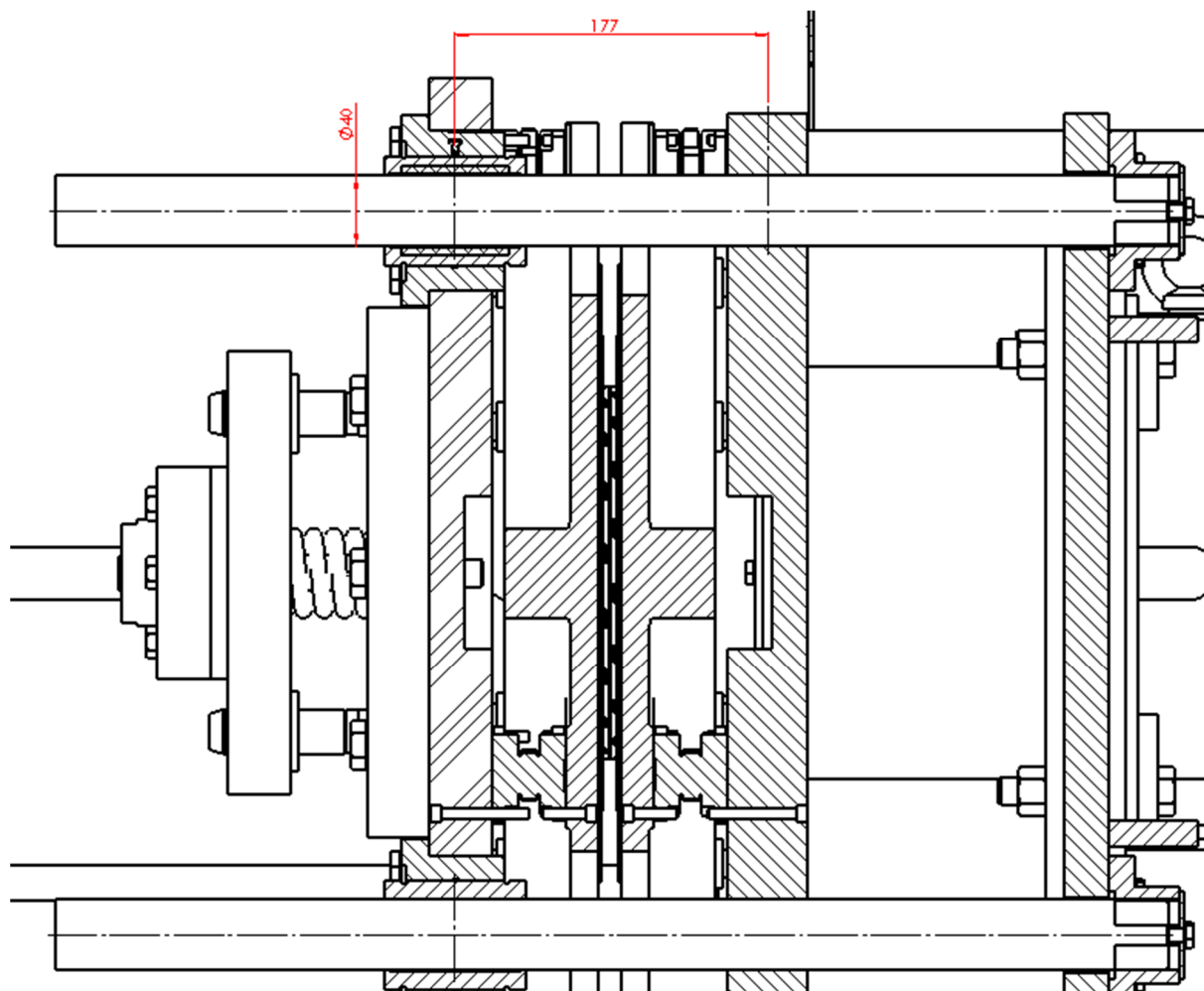
Minimalni tlak za naležne površine komponenata izrađenih od čelika prema [25] Tablica 12.1 iznosi  $p_0 = 150 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ , a dopušteni tlak za spojeve s P4C profilom i istosmjerne jake udare iznosi

$$p_{\text{dop}} = 0,75 \cdot p_0 = 0,75 \cdot 150 = 112,5 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} . \quad (6.83)$$

Kako je  $p < p_{\text{dop}}$  spoj zadovoljava.

#### 6.4. Sklop vodicica

Kako bi se omogućila izmjena ispitnih uzoraka odnosno tarnih ploči spojke te kako bi se omogućio prihvat različitih debljina spojke, jedan od reaktivnih sklopova smješten je na četiri uzdužno postavljene vodilice kružnog poprečnog presjeka s kliznim elementima opremljenima kugličnim ležajevima. Na [Slika 63] prikazana je konstrukcijska izvedba vodicica u stroju.

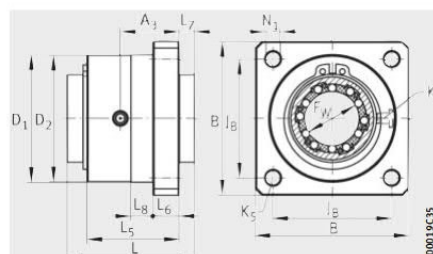


Slika 63. Izvedba vodicica

Za vodilice su odabrane linerne vodilice kružnog poprečnog presjeka s kliznim elementima koji su opremljeni kugličnim ležajevima proizvođača FAG oznake KFB-40B-PP-AS. Tehnički podaci odabrane vodilice prikazani su na [Slika 64].

### Machined range

**Linear ball bearing and housing unit**  
With flange  
Sealed  
Greased, with relubrication facility



KFB...-B-PP-AS

Dimension table - Dimensions in mm									
Designation	Mass m ≈g	Dimensions				Mounting dimensions			
		F <sub>W</sub>		B	L	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	A <sub>3</sub>
			Tolerances						
KFB12-B-PP-AS	80	12	+0,008 0	40	32	22	6	4,2	11,5
KFB16-B-PP-AS	120	16	+0,009 -0,001	50	36	24	8	5,2	12,5
KFB20-B-PP-AS	220	20	+0,009 -0,001	60	45	30	10	6,7	15,8
KFB25-B-PP-AS	430	25	+0,011 -0,001	70	58	42	12	7	22
KFB30-B-PP-AS	640	30	+0,011 -0,001	80	68	50	14	8	26
<b>KFB40-B-PP-AS</b>	<b>1 280</b>	<b>40</b>	<b>+0,013 -0,002</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>59</b>	<b>16</b>	<b>9,2</b>	<b>30,3</b>
KFB50-B-PP-AS	2 160	50	+0,013 -0,002	130	100	75	18	11,2	38,8

							Ball rows	Basic load ratings <sup>1)</sup>	
N <sub>1</sub>	K <sub>5</sub> <sup>2)</sup>	D <sub>1</sub> +0,2	D <sub>2</sub> g7	I <sub>B</sub>	L <sub>8</sub>	K <sub>8</sub> <sup>3)</sup>	Quantity	dyn. C N	stat. C <sub>0</sub> N
5,5	M5	31,5	32	30	10	NIPD3	5	540	385
5,5	M5	37,5	38	35	10	NIPD3	5	710	530
6,6	M6	45,5	46	42	10	NIPD3	6	1 570	1 230
6,6	M6	57,5	58	54	10	NIPA1	6	2 800	2 220
9	M8	65,5	66	60	10	NIPA1	6	3 600	2 850
<b>11</b>	<b>M10</b>	<b>89,5</b>	<b>90</b>	<b>78</b>	<b>10</b>	<b>NIPA1</b>	<b>6</b>	<b>6 000</b>	<b>4 400</b>
11	M10	97,5	98	98	10	NIPA2	6	8 700	6 300

Slika 64. Tehnički podaci odabrane vodilice

Vodilice su najopterećenije u zatvorenom položaju, a opterećene su silama uslijed momenta torzije koji biva prenesen preko jedne tarne površine tarne ploče spojke na reaktivni sklop te težinom reaktivnog sklopa. Kako je za ispitni uređaj važna krutost sustava, nakon provjere zadovoljavanja kliznih elemenata vodilica, provest će se provjera progiba vodilica za najopterećeniji slučaj. Na [Slika 65] prikazan je poprečni presjek s položajem vodilica i naznačenim opterećenjima. Za svaku od vodilica potrebno je odrediti iznose sila s obzirom na referentni Z-Y koordinatni sustav.

Kako je

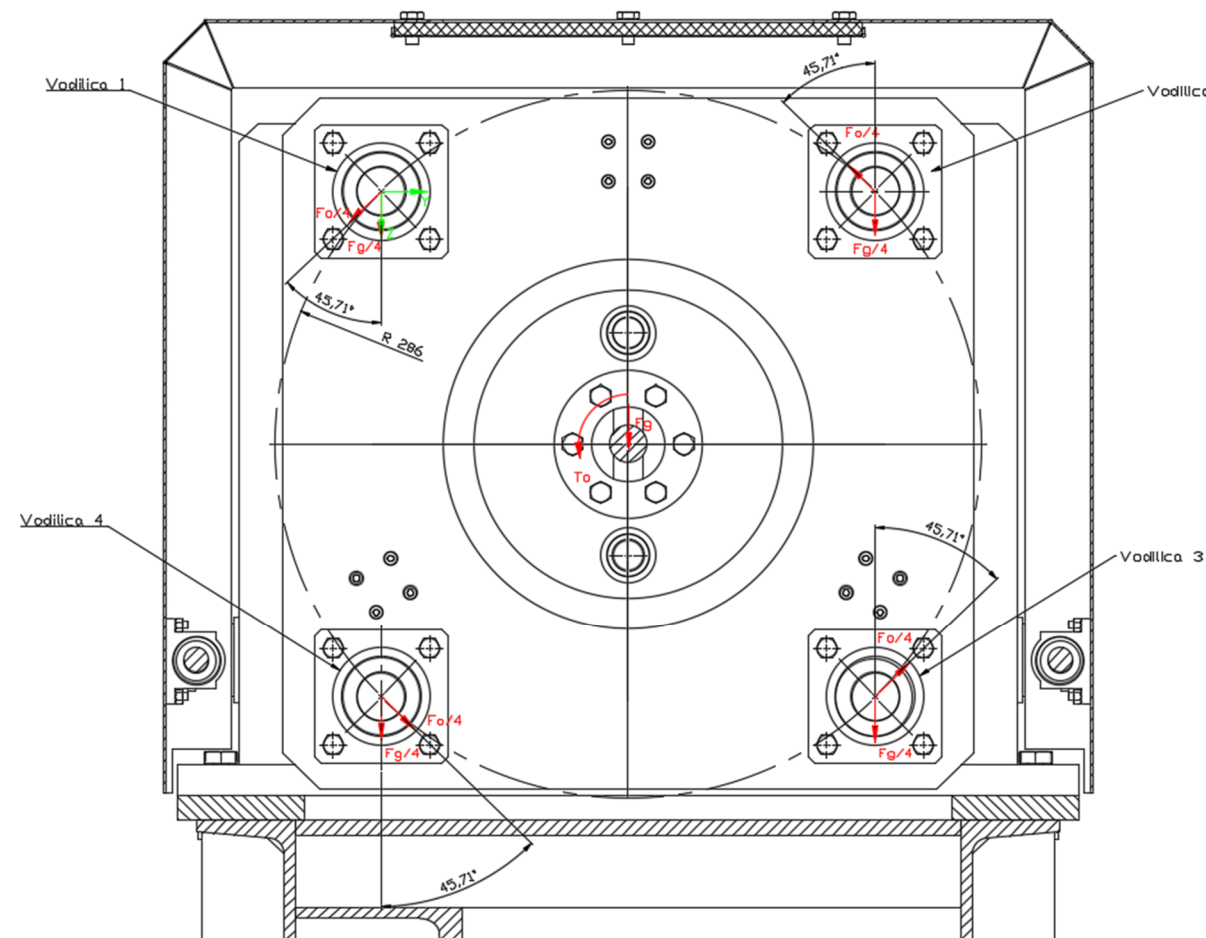
$$F_o = \frac{T_o}{R_{vo}}, \quad (6.84)$$

gdje je okretni moment na reaktivni sklop prema (6.20)  $T_o = 300 \text{ Nm}$ , a uz konstrukcije dobiven radijus udaljenosti vodilica od centra  $R_{vo} = 286 \text{ mm}$ . Uvrštavanjem vrijednosti u (6.84) dobivamo

$$F_o = \frac{T_o}{R_{vo}} = \frac{300 \cdot 10^3}{286} = 1049 \text{ N}. \quad (6.85)$$

Reaktivni sklop ovješén na vodilice teži  $m_{p \text{ reaktivnog}} = 118 \text{ kg}$ . Iz čega dobivamo

$$F_G = m_{p \text{ reaktivnog}} \cdot g = 118 \cdot 10 = 1180 \text{ N}. \quad (6.86)$$



Slika 65. Opterećenja vodilica

6.4.1.1. *Vodilica 1*

Uvrštavanjem vrijednosti iz (6.85) te (6.86) u izraze za silu u smjeru osi Z i Y imamo:

$$F_{Z1} = \frac{F_G}{4} + \frac{F_O}{4} \cdot \cos(45, 71) = \frac{1180}{4} + \frac{1049}{4} \cdot \cos(45, 71) = 478 \text{ N}, \quad (6.87)$$

$$F_{Y1} = \frac{F_O}{4} \cdot \sin(45, 71) = \frac{1049}{4} \cdot \sin(45, 71) = -188 \text{ N}. \quad (6.88)$$

Rezultantna sila na vodilicu 1 iznosi

$$F_1 = \sqrt{F_{Y1}^2 + F_{Z1}^2} = \sqrt{478^2 + (-188)^2} = 514 \text{ N}. \quad (6.89)$$

6.4.1.2. *Vodilica 2*

Uvrštavanjem vrijednosti iz (5.85) te (5.86) u izraze za silu u smjeru osi Z i Y imamo:

$$F_{Z2} = \frac{F_G}{4} - \frac{F_O}{4} \cdot \cos(45, 71) = \frac{1180}{4} - \frac{1049}{4} \cdot \cos(45, 71) = 112 \text{ N}, \quad (6.90)$$

$$F_{Y2} = \frac{F_O}{4} \cdot \sin(45, 71) = \frac{1049}{4} \cdot \sin(45, 71) = -188 \text{ N}. \quad (6.91)$$

Rezultantna sila na vodilicu 2 iznosi

$$F_2 = \sqrt{F_{Y2}^2 + F_{Z2}^2} = \sqrt{112^2 + 188^2} = 219 \text{ N}. \quad (6.92)$$

6.4.1.3. *Vodilica 3*

Uvrštavanjem vrijednosti iz (5.85) te (5.86) u izraze za silu u smjeru osi Z i Y imamo:

$$F_{Z3} = \frac{F_G}{4} - \frac{F_O}{4} \cdot \cos(45, 71) = \frac{1180}{4} - \frac{1049}{4} \cdot \cos(45, 71) = 112 \text{ N}, \quad (6.93)$$

$$F_{Y3} = \frac{F_O}{4} \cdot \sin(45, 71) = \frac{1049}{4} \cdot \sin(45, 71) = 188 \text{ N}. \quad (6.94)$$

Rezultantna sila na vodilicu 3 iznosi

$$F_3 = \sqrt{F_{Y3}^2 + F_{Z3}^2} = \sqrt{112^2 + 188^2} = 219 \text{ N}. \quad (6.95)$$

6.4.1.4. *Vodilica 4*

Uvrštavanjem vrijednosti iz (6.85) te (6.86) u izraze za silu u smjeru osi Z i Y imamo:

$$F_{Z4} = \frac{F_G}{4} + \frac{F_O}{4} \cdot \cos(45, 71) = \frac{1180}{4} + \frac{1049}{4} \cdot \cos(44, 29) = 478 \text{ N}, \quad (6.96)$$

$$F_{Y4} = \frac{F_O}{4} \cdot \sin(45, 71) = \frac{1049}{4} \cdot \sin(45, 71) = 188 \text{ N}. \quad (6.97)$$



Rezultantna sila na vodilicu 4 iznosi

$$F_4 = \sqrt{F_{Y4}^2 + F_{Z4}^2} = \sqrt{478^2 + 188^2} = 514 \text{ N}. \quad (6.98)$$

Vidimo kako su resultantne sile maksimalnog iznosa na vodilice 1 i 4. S obzirom kako sklop ovješena na vodilice većinu vremena miruje, provjera kliznog elementa izvršava se za statički slučaj. Prema [28] faktor sigurnosti statičkog slučaja mora biti  $S_0 \geq 4$ , a izraz za faktor sigurnosti glasi

$$S_0 = \frac{C_0}{P_0}, \quad (6.99)$$

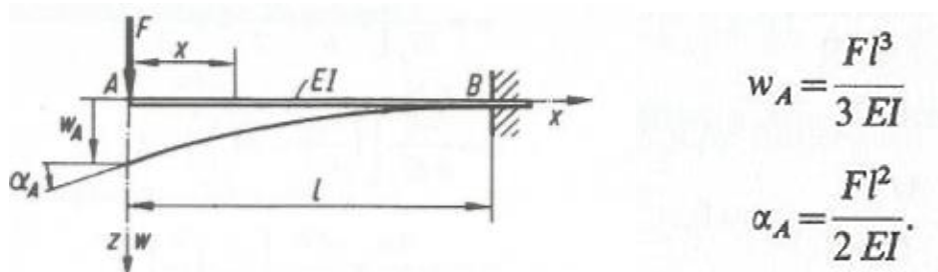
gdje je  $C_0$  statička nosivost te  $P_0$  ekvivalentno statičko opterećenje. Ekvivalentno statičko opterećenje iznosi  $P_0 = F_1 = F_4 = 514 \text{ N}$ . Prema podacima za klizni element vodilice [Slika 64] statička nosivost iznosi  $C_0 = 4400 \text{ N}$ . Uvrštavanjem vrijednosti u izraz (6.99) dobivamo statički faktor sigurnosti

$$S_0 = \frac{4400}{514} = 8,56 > 4. \quad (6.100)$$

Iz navedenog izraza vidljivo je kako klizni element vodilice zadovoljava.

#### 6.4.1.5. Kontrola progiba

Kako je opterećenje na vodilice u zatvorenom položaju najveće, potrebno je provesti kontrolu progiba za radni zatvoreni položaj. Vodilice se diskretiziraju kao grede ukliještene u jednom osloncu, a proračun se vrši prema izrazu iz [30] prikazanom na [Slika 66].



Slika 66. Konzola opterećena silom na kraju[30]

Prema [22] izraz za moment tromosti kružnog poprečnog presjeka glasi

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi \cdot d^4}{64} . \quad (6.101)$$

Uvrštavanjem promjera osovine vodilice  $d = 40 \text{ mm}$  dobivamo

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi \cdot 40^4}{64} = 125663,7 \text{ mm}^4 . \quad (6.102)$$

Osovine vodilice izrađene su od čelika Cf 53 što znači da modul elastičnosti iznosi  $E = 210000 \text{ MPa}$ . Duljina vodilice na kojoj računamo progib prema [Slika 63] iznosi  $l_{\text{zatvoreno}} = 177 \text{ mm}$ . Uvrštavanjem navedenih vrijednosti te maksimalne komponente sile u smjeru osi Z,  $F_{Z1} = 478 \text{ N}$  u izraz za progib sa [Slika 66] dobivamo iznos progiba u smjeru osi Z;

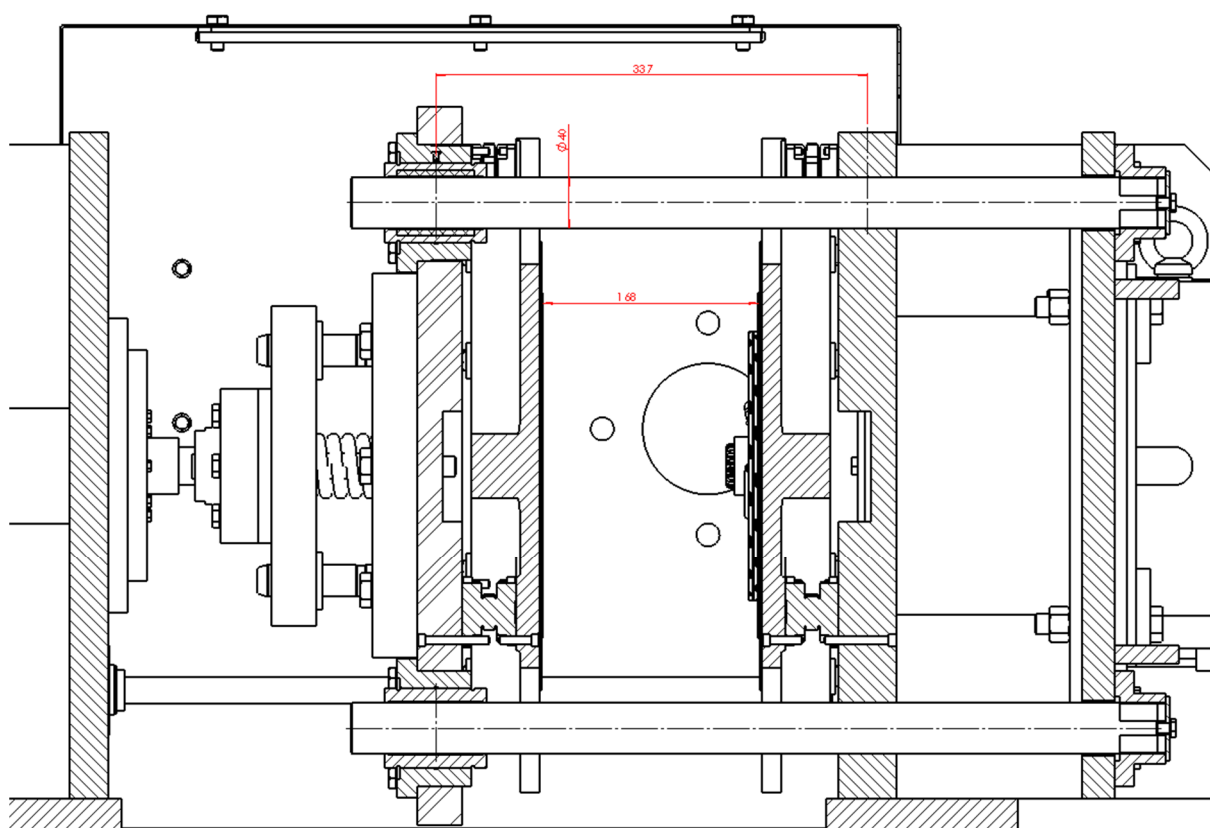
$$w_Z = \frac{F_{Z1} \cdot l_{\text{zatvoreno}}^3}{3 \cdot E \cdot I_Z} = \frac{478 \cdot 177^3}{3 \cdot 210000 \cdot 125663,7} = 0,034 \text{ mm} . \quad (6.103)$$

Uvrštavanjem navedenih vrijednosti te maksimalne komponente sile u smjeru osi Y,  $F_{Y1} = 188 \text{ N}$  u izraz za progib sa [Slika 66] dobivamo iznos progiba u smjeru osi Y;

$$w_Y = \frac{F_{Y1} \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot I_Y} = \frac{188 \cdot 177^3}{3 \cdot 210000 \cdot 125663,7} = 0,013 \text{ mm} . \quad (6.104)$$

Potrebno je još provjeriti progib kada je stroj otvoren [Slika 67].





**Slika 67. Prikaz stroja sa reaktivnim pomičnim članom u krajnjem otvorenom položaju**

U otvorenom položaju vodilice su opterećene samo uslijed težine pomičnog reaktivnog člana te imamo

$$F_{Z \text{ otvoreno}} = \frac{F_G}{4} = \frac{1180}{4} = 295 \text{ N} . \quad (6.105)$$

Duljina vodilice na kojoj računamo progib prema [Slika 67] iznosi  $l_{\text{otvoreno}} = 337 \text{ mm}$ .

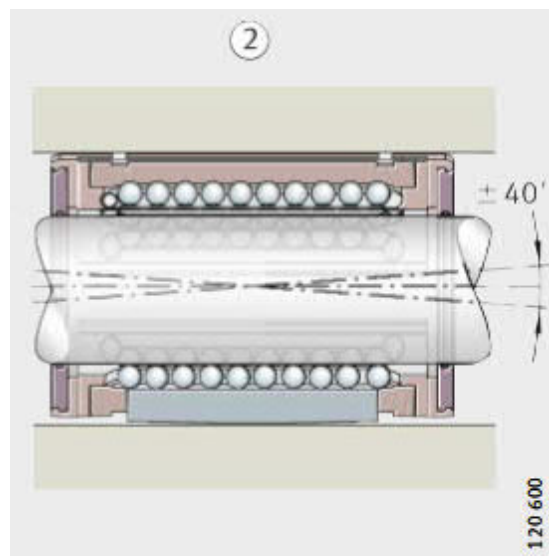
Uvrštavanjem navedenih vrijednosti te maksimalne komponente sile u smjeru osi Z ,  $F_{Z1} = 478 \text{ N}$  u izraz za progib sa [Slika 66] dobivamo iznos progiba u smjeru osi Z;

$$w_{Z \text{ otvoreno}} = \frac{F_{Z \text{ otvoreno}} \cdot l_{\text{otvoreno}}^3}{3 \cdot E \cdot I_Z} = \frac{295 \cdot 337^3}{3 \cdot 210000 \cdot 125663,7} = 0,143 \text{ mm} . \quad (6.106)$$

Potrebno je provjeriti nagib linije savijanja na mjestu progiba prema [30];

$$\alpha_A = \frac{F_{Z \text{ otvoreno}} \cdot l_{\text{otvoreno}}^2}{2 \cdot E \cdot I_Z} = \frac{295 \cdot 337^2}{2 \cdot 210000 \cdot 125663,7} = 0,0006348 \text{ rad} = 2,182' . \quad (6.107)$$

Dozvoljeni nagib za sustav vodilica s kugličnim ležajevima iznosi  $40'$ .

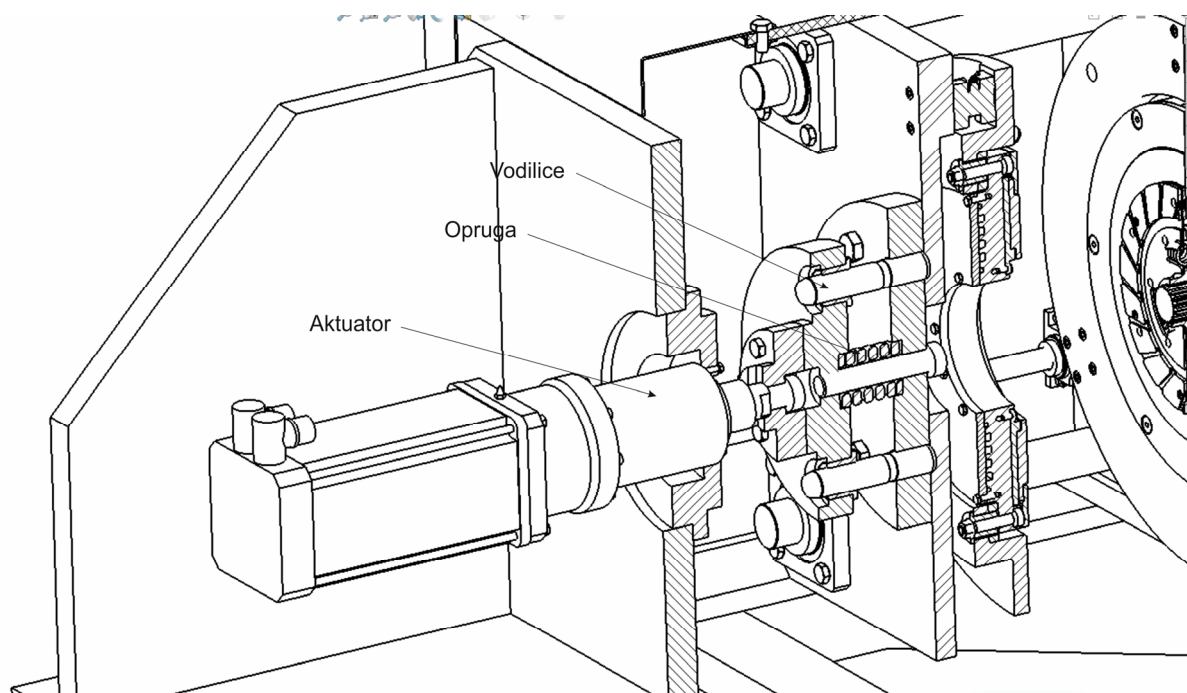


**Slika 68. Dozvoljeni kut nagiba za sustav vodilice s kugličnim ležajevima [28]**

Vidljivo je kako su iznosi progiba u zatvorenom položaju stroja te progib i nagib u otvorenom položaju stroja vrlo malenog iznosa te vrlo vjerojatno neće značajnije utjecati na funkciju otvaranja i zatvaranje stroja kao ni nosivost sustava vodilica.

## 6.5. Izvedba sklop opruge i aktuatora

Zatvaranje i otvaranje te ostvarivanje adekvatne normalne sile uređaja ostvareno je linearnim aktuatorom s navojnim vretenom. Normalna sila prenosi se preko opruge smještene u sklopu opruge na pomični reaktivni sklop. Sklop opruge izveden je tako da se omogućí smještaj, adekvatno vođenje same opruge prilikom njezinog sabijanja, adekvatan prihvat aktuatora te pričvršćivanje sklopa za pomični reaktivni sklop. Zadaća opruge je prigušenje aksijalnih vibracija koje nastaju prilikom ispitivanja. Na [Slika 69] prikazana je izvedba sklopa opruge te smještaj aktuatora.



Slika 69. Izvedba sklopa opruge te smještaj aktuatora

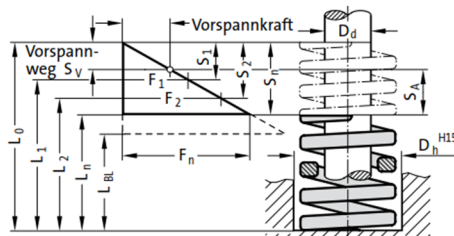
### 6.5.1.1. Odabir opruge

Oprugu je potrebno odabrati tako da se pokrije cijeli raspon iznosa normalne sile koji se javlja tokom ispitivanja. Prema [Tablica 3] vrijednosti normalne sile prilikom ispitivanja kreće se od  $F_{N_4} = 1136 \text{ N}$  do  $F_{N_1} = 8562 \text{ N}$ . S obzirom na raspon normalne sile odabrana je opruga proizvođača FIBRO DIN ISO 10243 vanjskog promjera  $D_H = 50 \text{ mm}$  i ugradbene visine  $L_0 = 64 \text{ mm}$  čiji su tehnički podaci prikazani na [Slika 70]. Iz tehničkih podataka vidljivo je kako će se opruga sabiti manje od 30% za najmanju normalnu silu te 62% za maksimalnu normalnu silu.

## Spezial-Schraubendruckfeder DIN ISO 10243


**FIBRO**

- $D_h$  = Hülsendurchmesser  
 $D_d$  = Dorndurchmesser (Innenführung)  
 $L_0$  = Länge der unbelast. Feder  
 $L_1 \dots L_n$  = Längen der belast. Feder, zugeordnet den Federkräften  $F_1 \dots F_n$   
 $L_{Bl}$  = Blocklänge d. Feder (Windung aneinander)  
 $F_1 \dots F_n$  = Federkräfte in N zugeordnet den Federlängen  $L_1 \dots L_n$   
 $S_{v1} \dots S_{v7}$  = mind. Federvorspannung zugeordnet den Federwegen  $S_1 \dots S_7$   
 $S_1 \dots S_n$  = Federwege zugeordnet d. Federkräften  $F_1 \dots F_n$   
 $R$  = Federrate in N/mm  
 $S_{A1} \dots S_{A7}$  = Arbeitsweg (Hub)



### 241.17. Spezial-Schraubendruckfeder DIN ISO 10243 Kennfarbe: „Gelb“

Bestell-Nummer	$D_h$	$D_d$	$L_0$	$R$	30% Federweg				40% Federweg				45% Federweg				50% Federweg			
					$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$
241.17.50.064	50,0	25,0	64	709	5,7	2,5	3,2	4041	7,6	2,5	5,1	5388	8,6	2,5	6,1	6097	9,5	3,4	6,1	6736
241.17.50.076	50,0	25,0	76	572	6,9	3,0	3,9	3947	9,2	3,0	6,2	5262	10,4	3,0	7,4	5949	11,5	4,1	7,4	6578
241.17.50.089	50,0	25,0	89	475	8,1	3,5	4,6	3848	10,8	3,5	7,3	5130	12,2	3,5	8,7	5795	13,5	4,9	8,6	6413
241.17.50.102	50,0	25,0	102	405	9,3	4,0	5,3	3767	12,4	4,0	8,4	5022	14,0	4,0	10,0	5670	15,5	5,6	9,9	6278
241.17.50.115	50,0	25,0	115	352	10,5	4,6	5,9	3696	14,0	4,6	9,4	4928	15,8	4,6	11,2	5562	17,5	6,3	11,2	6160
241.17.50.127	50,0	25,0	127	316	11,7	5,1	6,6	3697	15,6	5,1	10,5	4930	17,6	5,1	12,5	5562	19,5	7,0	12,5	6162
241.17.50.152	50,0	25,0	152	239	14,1	6,1	8,0	3370	18,8	6,1	12,7	4493	21,2	6,1	15,1	5067	23,5	8,5	15,0	5617
241.17.50.203	50,0	25,0	203	187	22,2	9,6	12,6	4151	29,6	9,6	20,0	5535	33,3	9,6	23,7	6227	37,0	13,3	23,7	6919
241.17.50.254	50,0	25,0	254	153	24,0	10,4	13,6	3672	32,0	10,4	21,6	4896	36,0	10,4	25,6	5508	40,0	14,4	25,6	6120
241.17.50.305	50,0	25,0	305	127	29,1	12,6	16,5	3696	38,8	12,6	26,2	4928	43,7	12,6	31,1	5550	48,5	17,5	31,0	6160

Bestell-Nummer	$D_h$	$D_d$	$L_0$	$R$	55% Federweg				62% Federweg				80% Federweg				100% Federweg			
					$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$F_1$
241.17.50.064	50,0	25,0	64	709	10,5	4,4	6,1	7445	11,8	5,7	6,1	8366	15,2	11,0	4,2	10777	19,0	45,0		13471,0
241.17.50.076	50,0	25,0	76	572	12,7	5,3	7,4	7264	14,3	6,9	7,4	8180	18,4	13,3	5,1	10523	23,0	55,0		15136,0
241.17.50.089	50,0	25,0	89	475	14,9	6,2	8,7	7078	16,7	8,1	8,6	7933	21,6	15,7	5,9	10260	27,0	62,0		12825,0
241.17.50.102	50,0	25,0	102	405	17,1	7,1	10,0	6926	19,2	9,3	9,9	7776	24,8	18,0	6,8	10044	31,0	71,0		12555,0
241.17.50.115	50,0	25,0	115	352	19,3	8,1	11,2	6794	21,7	10,5	11,2	7638	28,0	20,3	7,7	9856	35,0	80,0		12320,0
241.17.50.127	50,0	25,0	127	316	21,5	9,0	12,5	6794	24,2	11,7	12,5	7647	31,2	22,6	8,6	9859	39,0	88,0		12324,0
241.17.50.152	50,0	25,0	152	239	25,9	10,8	15,1	6190	29,1	14,1	15,0	6955	37,6	27,3	10,3	8986	47,0	105,0		11233,0
241.17.50.203	50,0	25,0	203	187	40,7	17,0	23,7	7611	45,9	22,2	23,7	8583	59,2	42,9	16,3	11070	74,0	129,0		13838,0
241.17.50.254	50,0	25,0	254	153	44,0	18,4	25,6	6732	49,6	24,0	25,6	7589	64,0	46,4	17,6	9792	80,0	174,0		12240,0
241.17.50.305	50,0	25,0	305	127	53,4	22,3	31,1	6782	60,1	29,1	31,0	7633	77,6	56,3	21,3	9855	97,0	208,0		12319,0

Slika 70. Tehnički podaci odabrane opruge [31]

#### 6.5.1.2. Odabir vodilica sklopa opruge te aksijalnih kliznih ležajeva

Kako bi se omogućilo sabijanje opruge bez zapinjanja odabrane su vodilice [Slika 71] oznake 2022.19 promjera  $d = 25$  mm te aksijalni klizni ležaj [Slika 72] oznake 2085.71 s ugrađenim mazivom proizvođača FIBRO.



2022.19. Führungssäule für Großwerkzeuge, DIN 9833/ISO 9182-3

[illegible]

### Bestell-Beispiel:

Führungssäule für Großwerkzeuge, DIN 9833/ISO 9182-3	= 2022.19.
Führungsdurchmesser $d_1$	63 mm = 063.
Länge $l_1$	180 mm = 180
Bestell-Nummer	= 2022.19.063.180

Änderungen vorbehalten

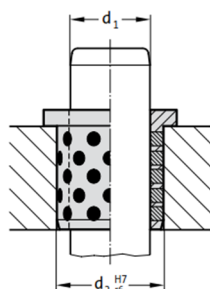
D47

**Slika 71. Tehnički podaci odabrane vodilice opruge [31]**

2085.71.

Führungsbuchse mit  
Bund, Bronze mit  
Festschmierstoff

Presspassung



2085.71.

Säule Ø d <sub>1</sub>	Bohrung d <sub>2</sub>	Toleranz d <sub>2</sub> H7
10	14	+0,018
12	18	0
13	19	
14	20	+0,021
15	21	0
16	22	
20	30	
25	35	
30	40	+0,025
31,5	40	0
35	45	
40	50	

Säule Ø d <sub>1</sub>	Bohrung d <sub>2</sub>	Toleranz d <sub>2</sub> H7
45	55	
50	60	+0,030
55	65	0
60	75	
63	75	
70	85	
75	90	+0,035
80	100	0
90	110	
100	120	
120	140	+0,040
		0

D298

Änderungen vorbehalten

Slika 72. Tehnički podaci aksijalnog klznog ležaja [31]

## 6.5.1.3. Odabir aktuatora

Potrebno je odabrati aktuator s obzirom na potreban hod prilikom zatvaranja i otvaranja uređaja koji omogućuje zamjenu ispitnog uzorka tj. tarne ploče spojke te maksimalnu normalnu silu  $F_{N1} = 8562 \text{ N}$ . S obzirom na navedene zahtjeve odabran je servo aktuator s navojnim vretenom proizvođača SKF oznake CEM C2404-170-1-63IB-05-MC16C-E s maksimalnom nominalnom aksijalnom silom od 13,1 kN i hodom od 170 mm [Slika 73].

Compact cylinders

Compact range

Performance specifications

Designation	Screw lead	Nominal force <sup>(1)</sup>	Peak force <sup>(2)</sup>	Linear speed	Standard stroke	Over-stroke <sup>(4)</sup>	Dynamic load	Nominal power	Controller size <sup>(5)</sup>
	mm	kN	kN	mm/s	mm	mm	kN	kW	-
CEMC1804-145-1-42J	3,75	4,7	10,3	350	145	1 (x2)	26,6	1,6	08
CEMC2404-....-62L	4,00	8,7	23,8	300	125-135-170	1 (x2)	61,0	2,6	16
CEMC2406-125-..-62L	6,00	5,8	15,9	450	125	1 (x2)	61,0	2,6	16
<b>CEMC2404-....-63I</b>	<b>4,00</b>	<b>13,1</b>	<b>26,0</b>	<b>300</b>	<b>125-135-170</b>	<b>1 (x2)</b>	<b>61,0</b>	<b>3,3</b>	<b>16</b>
CEMC2406-125-..-63I	6,00	8,7	17,3	450	125	1 (x2)	61,0	3,3	16

Slika 73. Tehnički podaci odabranog aktuatora [32]

## **7. ZAKLJUČAK**

Ovim radom je razvijen i konstrukcijski razrađen uređaj koji omogućuje ispitivanje automobilskih tarnih suhih spojki. Prilikom koncipiranja presudne su bile informacije dobivene proučavanjem postojećih uređaja pri čemu su uočeni neki od glavnih nedostataka takvih uređaja kao što su nejednoliko trošenje uzoraka, nejednoliko zagrijavanje te neodgovarajući pritisak između naležnih površina. Uređaj se pokušao tako koncipirati da se eliminiraju ovi poznati nedostaci s ciljem dobivanja točnijih rezultata. U konstrukcijskoj razradi najviše vremena posvetilo se razradi reaktivnog sklopa koji mora ispunjavati dva oprečna zahtjeva. Brzo i adekvatno odvođenje topline nastale trenjem kako bi se spriječilo pregrijavanje senzora kao i adekvatno zagrijavanje reaktivnih članova do maksimalne temperature ispitivanja. Masa reaktivnog sklopa presudan je parametar za ostvarivanje adekvatnog zagrijavanja. Manja masa omogućuje brže zagrijavanje te lakšu izvedbu reaktivnog sklopa. Veća masa povećava potrebnu snagu grijača te produžuje njegovo vrijeme zagrijavanja. Važan aspekt procesa hlađenja i zagrijavanja jest adekvatno odrađen automatski sustav regulacije koji može pospješiti hlađenje i zagrijavanje pravovremenim uključivanjem, a nije sadržan u ovom radu. Temperaturne razlike kao i problem prijelaza topline kroz raspore između ploha komponenata reaktivnog sklopa predstavljaju potencijalnu opasnost od toplinskih deformacija koje mogu narušiti točnost mjerenja. Neke od uočenih nedostataka kao što je jače temperaturno širenje središnjeg dijela reaktivnog sklopa u odnosu na vanjsku prirubnicu senzora riješeni su konstrukcijski radijalno postavljenim izduženim provrtima. Kako je ovakav uređaj prototip, prave pokazatelje s obzirom na uspješnost ovakve izvedbe moguće je tek dobiti u eksploataciji uređaja.

## LITERATURA

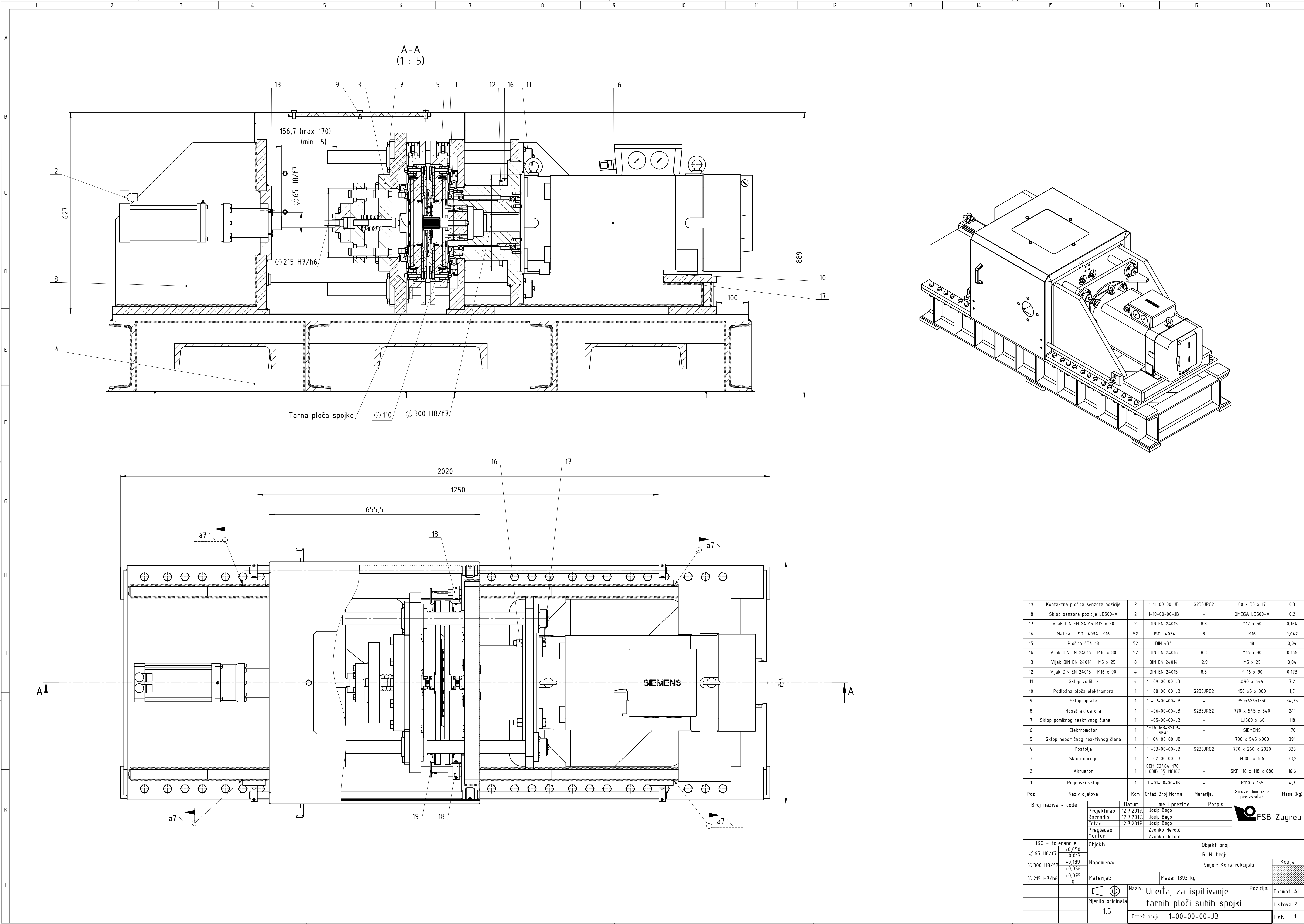
- [1] Harald Naunheimer, Bernd Bertsche, ·Joachim Ryborz, Wolfgang Novak; „Automotive Transmissions Fundamentals, Selection, Design and Application“, 2011, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1994, 2011
- [2] Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik 27. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel-Tehnika motornih vozila, prijevod Goran Popović
- [3] Automotive Transmissions, Second Edition, Springer 2011.
- [4] Fachkunde Kraftfahrzeugtechnik 30. Auflage, Verlag Europa Lehrmittel-Tehnika motornih vozila, prijevod Goran Popović
- [5] [http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/\\_shared\\_media/08\\_media\\_library/01\\_publications/automotiveaftermarket/brochure\\_1/downloads\\_5/luk\\_5/luk\\_tech\\_sac\\_en.pdf](http://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/automotiveaftermarket/brochure_1/downloads_5/luk_5/luk_tech_sac_en.pdf)
- [6] Khamlichi, A.1, Bezzazi, M.1, Jabbouri, A.1, Reis P.2 and Davim, J. P.2; Optimizing friction behavior of clutch facings using pin-on-disk test
- [7] <http://www.ttz.de/products/tribometers,en>
- [8] K. Kabus, F. Rieg, F. Wiedermann, G. Engelken, Decker Maschinenelemente 18., aktualisierte Auflage
- [9] <https://structuredatabase.wordpress.com/fault-rocks/silica-gels-as-fault-lubricants/>
- [10] N. Laraqi a, N. Alilat a, J.M. Garcia de Maria b, A. Baïri a; Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device Exact analytical solution
- [11] Matija Hoić , Mario Hrgetić , Joško Deur; Design of a pin-on-disc-type CNC tribometer including an automotive dry clutch application ;
- [12] Schaeffler Friction Products Industriestrasse 7 Anwendungstechnik / Application engineering Hamm GmbH Industrietechnikmaterial (Industrial Friction Material) L-502
- [13] Technical Pocket Guide Schaeffler
- [14] <https://support.industry.siemens.com/cs/document/28708289/simodrive-611-1ft6-synchronous-motors?dti=0&lc=en-WW>
- [15] <https://www.hbm.com/en/3215/strain-gauges-or-piezoelectric-sensors/>
- [16] Hoffmann, K.: Applying the Wheatstone Bridge Circuit




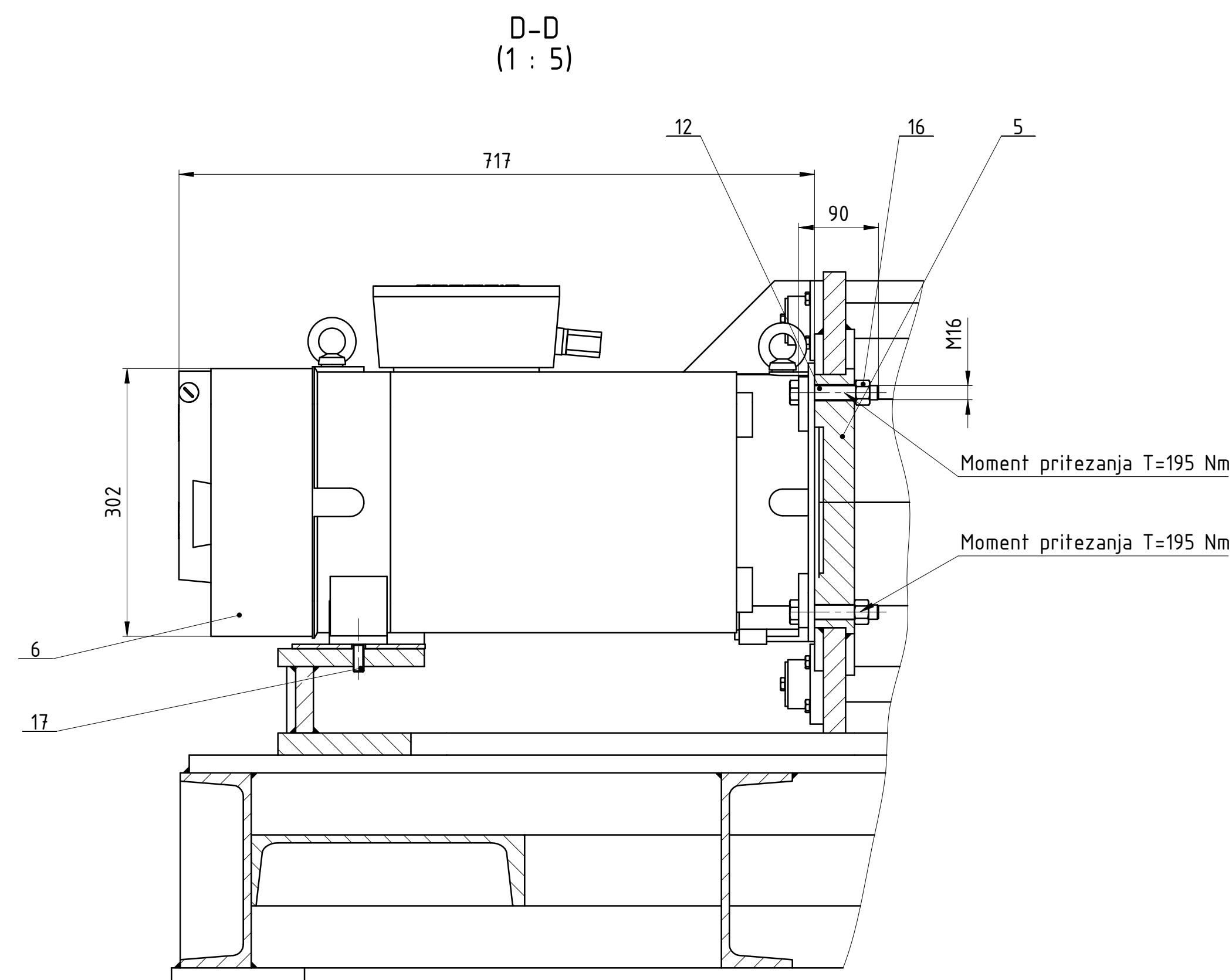
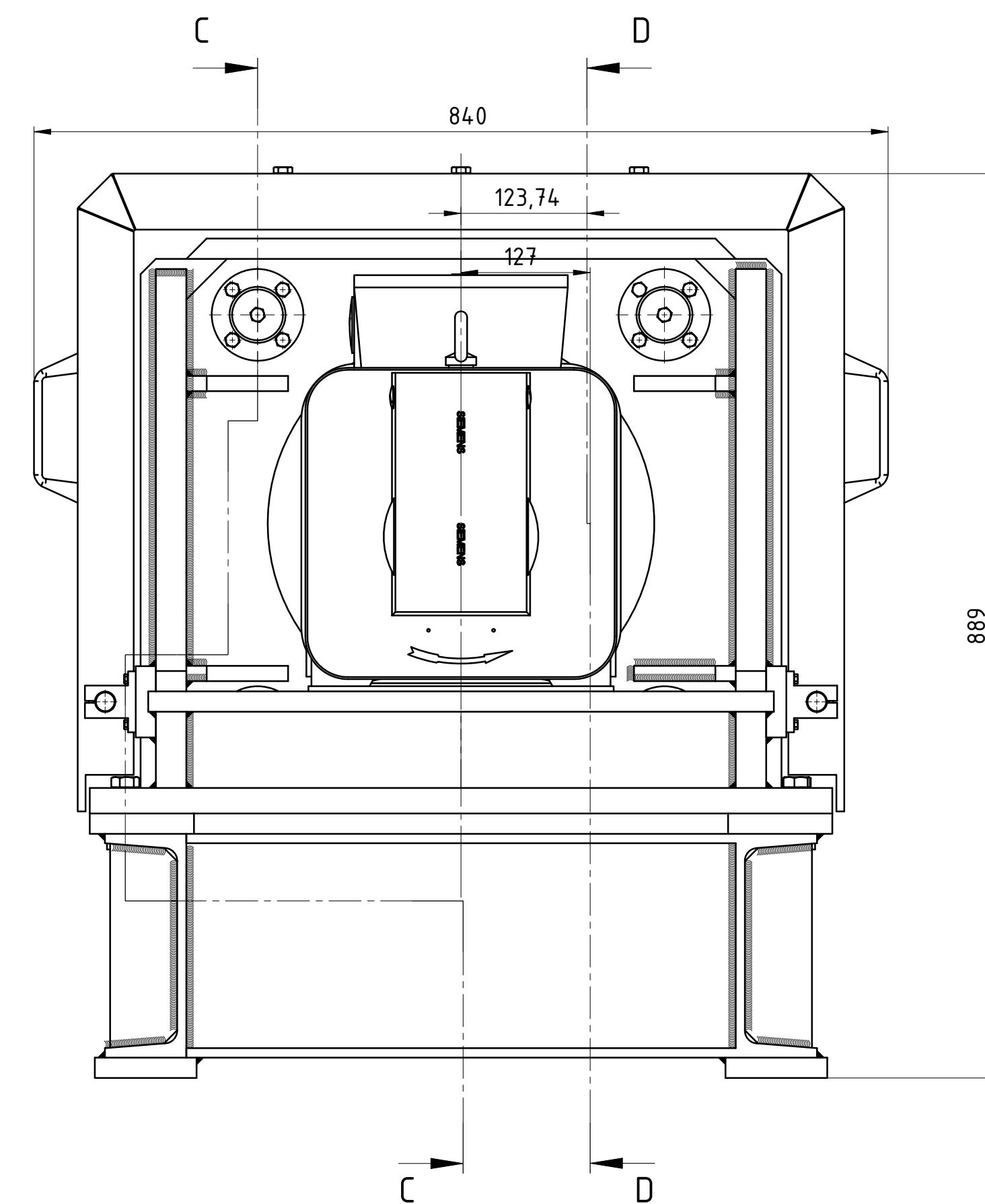
- [17] <https://www.kistler.com/?type=669&fid=278&model=download&callee=frontend>
- [18] K. Kabus, F. Rieg, F. Wiedermann, G. Engelken; Decker Maschinen-elemente Formeln 6., aktualiserte Auflage
- [19] <https://www.kistler.com/?type=669&fid=51234>
- [20] Boris Halasz, Antun Galović, Ivanka Boras; Toplinske tablice, Zagreb 2010.
- [21] Antun Galović; Termodinamika 2, Zagreb, 2010.
- [22] Kraut, B.: Strojarski priručnik, Sajema Zagreb, 2009.
- [23] <http://www.kanthal.com/globalassets/kanthal-global/downloads/materials-in-wire-and-strip-form/resistance-heating-wire-and-strip/s-ka026-b-eng-2012-01.pdf>
- [24] SCHAEFFLER Tehnical Pocket Guide, Schaeffler Technologies GmbH
- [25] K. Kabus, F. Rieg, F. Wiedermann, G. Engelken; Decker Maschinen-elemente Tabellen 18., aktualiserte Auflage
- [26] SKF, Rolling bearings catalogue, <http://www.skf.com/binary/77-121486/SKF-rolling-bearings-catalogue.pdf>
- [27] KTR, Antriebstechnik, <https://www.ktr.com/de/tools-downloads/kataloge-broschueren/>
- [28] FAG, Shaft guidance system catalogue, <http://www.fag.de/content.fag.de/en/mediathek/library/library-detail-language.jsp?id=2791138>
- [29] <http://www.chegg.com/homework-help/questions-and-answers/application-deflection-analysis-beams-matlab-create-user-defined-function-perform-numerica-q9262465>
- [30] Ivo Alfirić, Nauka o čvrstoći 1., ITP „Tehnička knjiga“ D.D – Zagreb, 1995.
- [31] FIBRO catalogue, <http://www.fibro.de/de/normalien/pdf-downloads.html>
- [32] SKF, Actuator-Range-Catalogue, <http://www.skf.com/binary/21-27487/Actuator-Range-Catalogue.pdf>
- [33] ISO- CYLINDERS, [https://content2.smcetech.com/pdf/ISO-CYLINDERS\\_EU.pdf](https://content2.smcetech.com/pdf/ISO-CYLINDERS_EU.pdf)
- [34] [http://www.parker.com/Literature/Industrial%20Cylinder/cylinder/cat/english/HY08-1130-6\\_NA\\_3L.pdf](http://www.parker.com/Literature/Industrial%20Cylinder/cylinder/cat/english/HY08-1130-6_NA_3L.pdf)
- [35] <http://www.omega.com/subsection/general-purpose-rtd-probes.html>
- [36] <http://asecertificationtraining.com/water-pumps-in-automotive-engine-coolant-systems/>


## **PRILOZI**

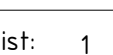
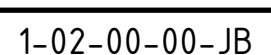
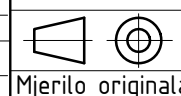
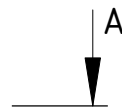
- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

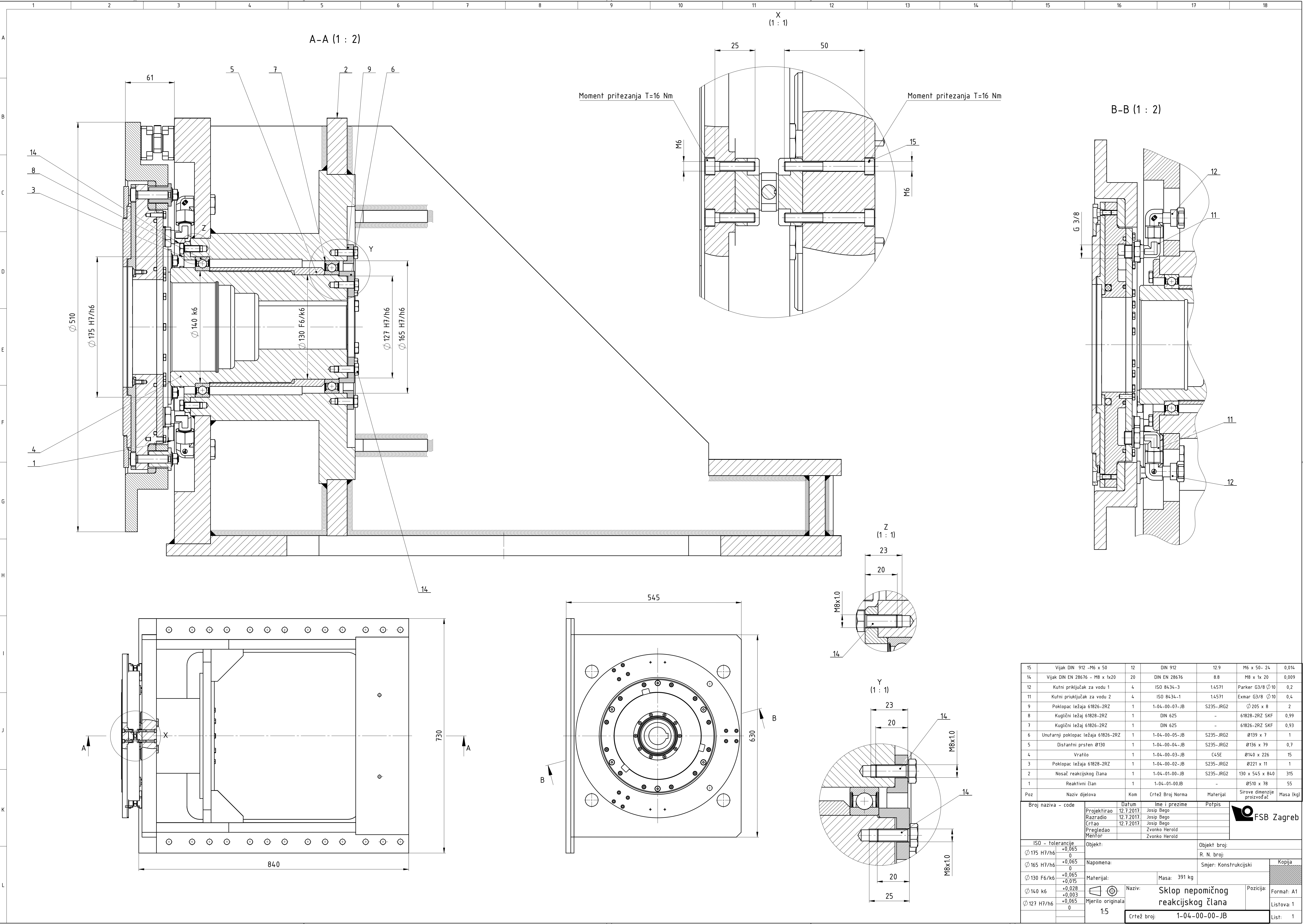


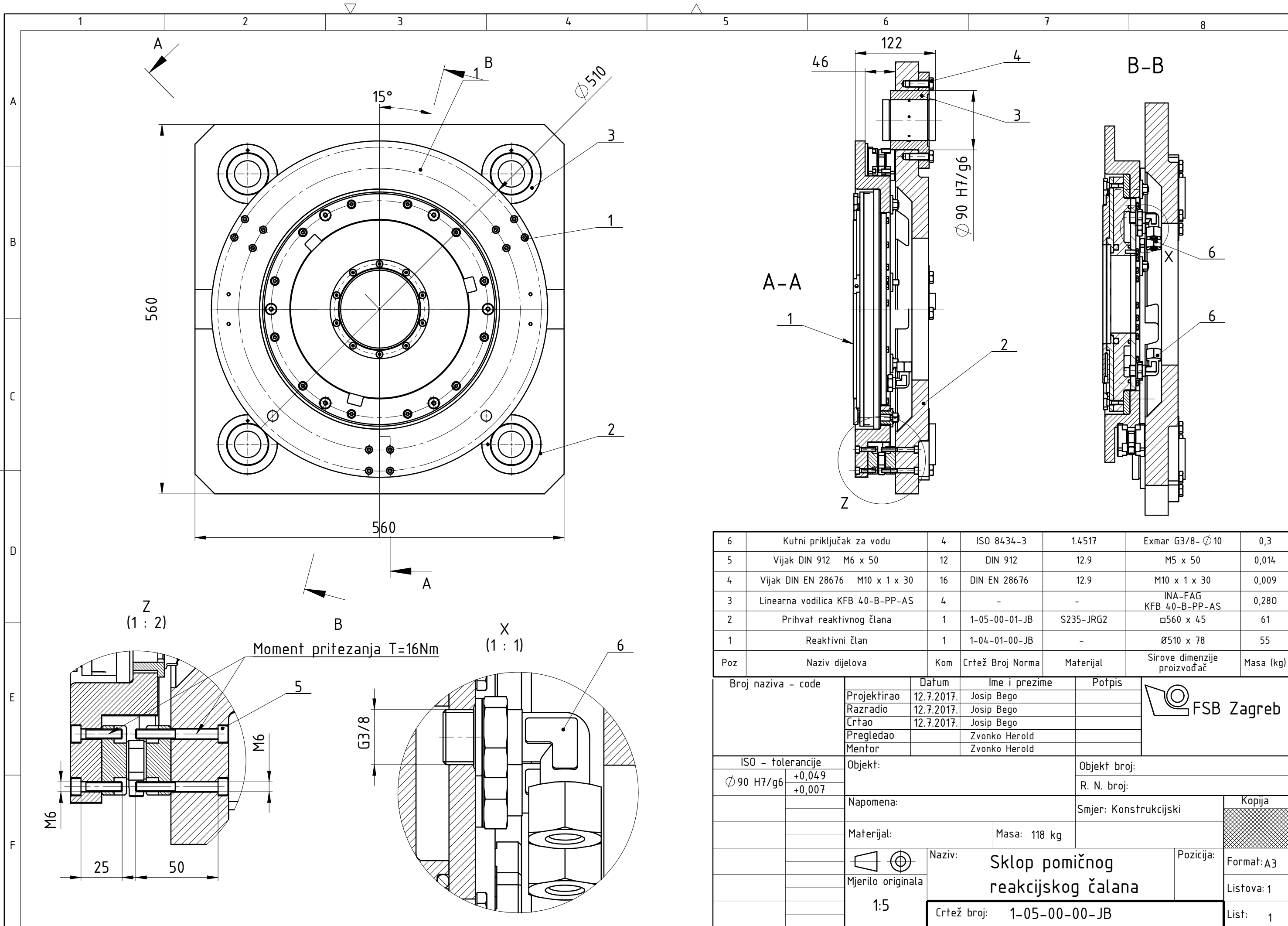
19	Kontaktna pločica senzora pozicije	2	1-11-00-00-JB	S235JR62	80 x 30 x 17	0,3			
18	Sklop senzora pozicije LD500-A	2	1-10-00-00-JB	-	OMEGA LD500-A	0,2			
17	Vijak DIN EN 24015 M12 x 50	2	DIN EN 24015	8.8	M12 x 50	0,164			
16	Matrica ISO 4034 M16	52	ISO 4034	8	M16	0,042			
15	Pločica 434-18	52	DIN 434		18	0,04			
14	Vijak DIN EN 24016 M16 x 80	52	DIN EN 24016	8.8	M16 x 80	0,166			
13	Vijak DIN EN 24014 M5 x 25	8	DIN EN 24014	12.9	M5 x 25	0,04			
12	Vijak DIN EN 24015 M16 x 90	4	DIN EN 24015	8.8	M 16 x 90	0,173			
11	Sklop vodilice	4	1-09-00-00-JB	-	Ø90 x 644	7,2			
10	Podložna ploča elektromora	1	1-08-00-00-JB	S235JR62	150 x5 x 300	1,7			
9	Sklop oplata	1	1-07-00-00-JB	-	750x626x1350	34,35			
8	Nosač akuatora	1	1-06-00-00-JB	S235JR62	770 x 545 x 840	241			
7	Sklop pomičnog reaktivnog člana	1	1-05-00-00-JB	-	□560 x 60	118			
6	Elektromotor	1	1FT6 163-8SD7-SFA1	-	SIEMENS	170			
5	Sklop nepomičnog reaktivnog člana	1	1-04-00-00-JB	-	730 x 545 x900	391			
4	Postolje	1	1-03-00-00-JB	S235JR62	770 x 260 x 2020	335			
3	Sklop opruge	1	1-02-00-00-JB	-	Ø300 x 166	38,2			
2	Aktuator	1	CEM C2404-170-1-631B-05-MC16C-E	-	SKF 118 x 118 x 680	16,6			
1	Pegonski sklop	1	1-01-00-00-JB	-	Ø110 x 155	4,7			
Poz	Naziv dijelova		Kom	Crtež	Broj	Norma	Materijal	Sirove dimenzije proizvođač	Masa (kg)
Broj naziva - code			Datum		Ime i prezime		Potpis		
Projektirao		12.7.2017.		Josip Bego					
Razradio		12.7.2017.		Josip Bego					
Crtao		12.7.2017.		Josip Bego					
Pregledao				Zvonko Herold					
Mentor				Zvonko Herold					
ISO - tolerancije			Objekt:			Objekt broj:			
Ø 65 H8/f7			+0,050			R. N. broj:			
			+0,013						
Ø 300 H8/f7			+0,189			Smjer: Konstrukcijski			
			+0,056			Kopija			
Ø 215 H7/h6			+0,075						
			0						




Broj naziva - code	Datum	Ime i prezime	Potpis	 <b>FSB Zagreb</b>	
Projekti: Rao	12.7.2017.	Josip Begić			
Razradio	12.7.2017.	Josip Begić			
Crtao		Josip Begić			
Pregledao		Zvonko Herold			
Mentor		Zvonko Herold			
ISO - tolerancije	Objekt:		Objekt broj:		
⌀ 40 H7/h6	+0.024 0		R. N. broj:		
	Napomena:		Smjer: Konstruktivski		Kopija
	Materijal:		Masa:		
 	Naziv: Uređaj za ispitivanje tarnih ploči suhih spojki		Pozicija:		Format: A1
Mjerilo originala					Listova: 1
1:5	Crtež broj: 1-00-00-00-JB				List: 1

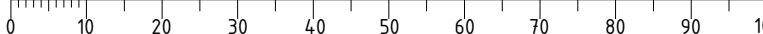


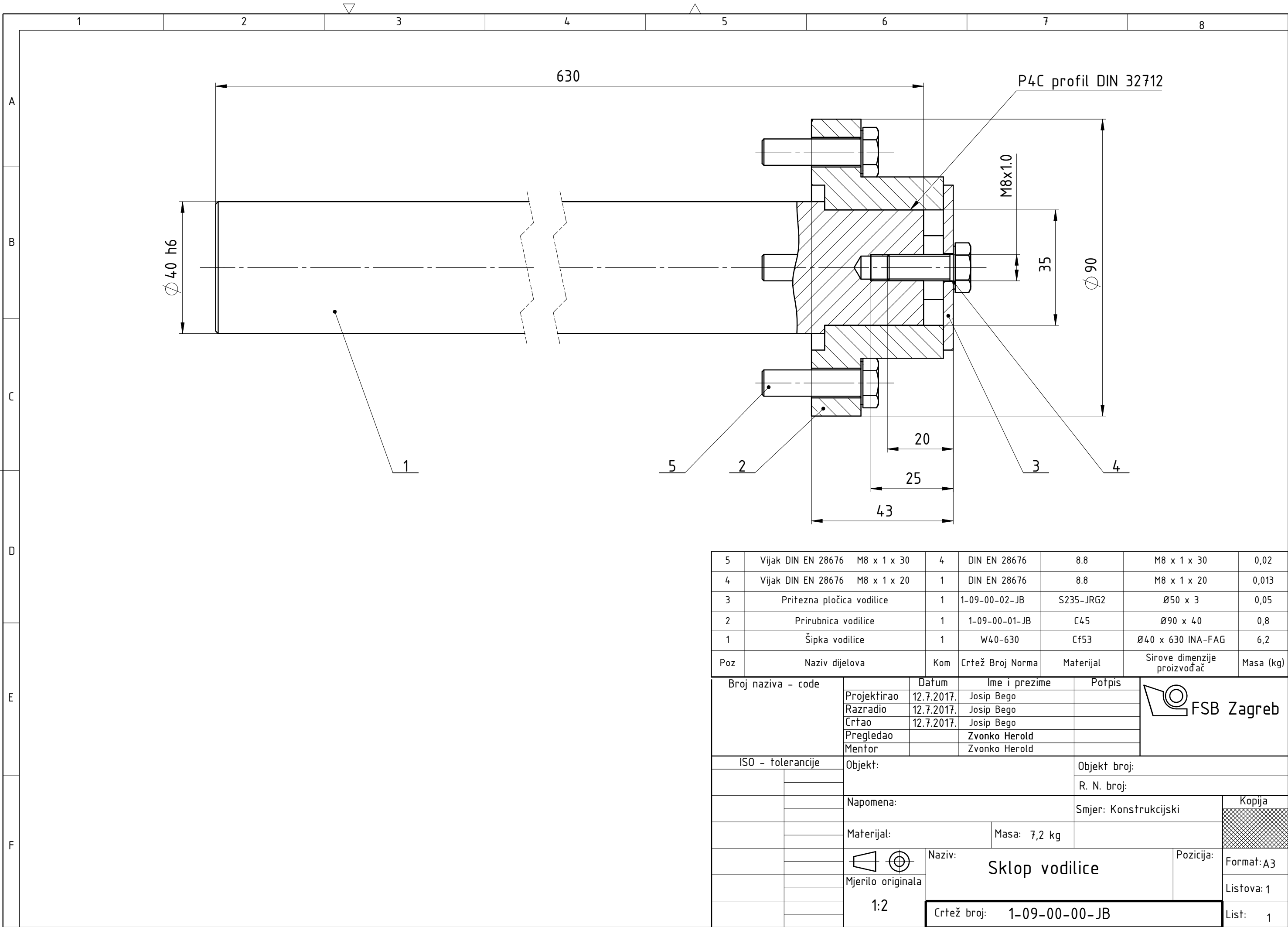




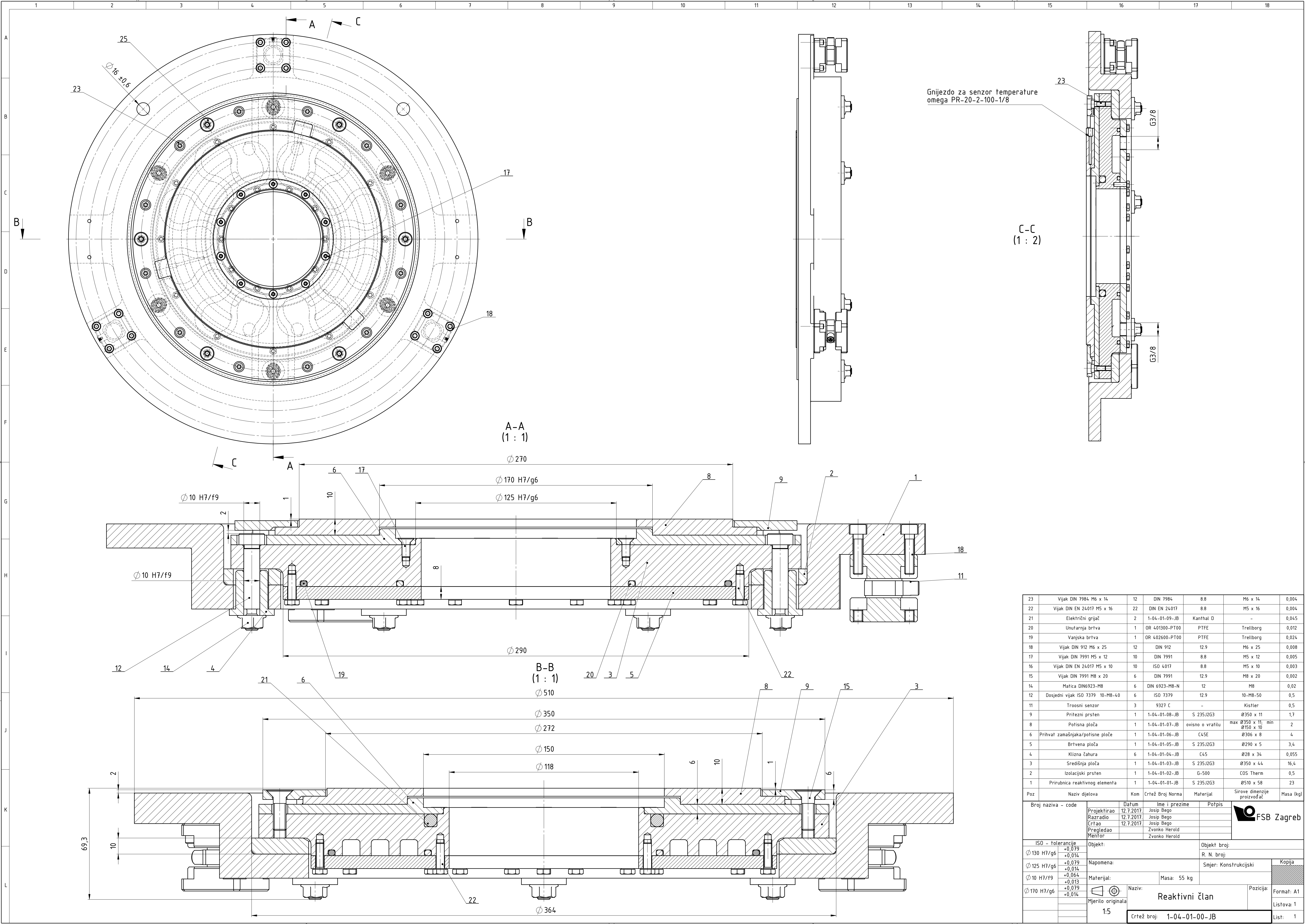
6	Kutni priključak za vodu	4	ISO 8434-3	1.4517	Exmar G3/8- Ø 10	0,3
5	Vijak DIN 912 M6 x 50	12	DIN 912	12.9	M5 x 50	0,014
4	Vijak DIN EN 28676 M10 x 1 x 30	16	DIN EN 28676	12.9	M10 x 1 x 30	0,009
3	Linearna vodilica KFB 40-B-PP-AS	4	-	-	INA-FAG KFB 40-B-PP-AS	0,280
2	Prihvat reaktivnog člana	1	1-05-00-01-JB	S235-JRG2	□560 x 45	61
1	Reaktivni član	1	1-04-01-00-JB	-	Ø510 x 78	55
Poz	Naziv dijelova	Kom	Crtež Broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije proizvođač	Masa (kg)

Broj naziva - code			Datum	Ime i prezime		Potpis	 FSB Zagreb
		Projektirao	12.7.2017.	Josip Bego			
		Razradio	12.7.2017.	Josip Bego			
		Crtao	12.7.2017.	Josip Bego			
		Pregledao		Zvonko Herold			
		Mentor		Zvonko Herold			
ISO - tolerancije		Objekt:				Objekt broj:	
Ø 90 H7/g6	+0,049					R. N. broj:	
	+0,007						
		Napomena:				Smjer: Konstrukcijski	
						Kopija	
		Materijal:		Masa: 118 kg			
				Naziv:		Pozicija:	Format: A3
				Sklop pomičnog reakcijskog člana			Listova: 1
							List: 1
		Mjerilo originala		Crtež broj: 1-05-00-00-JB			
		1:5					



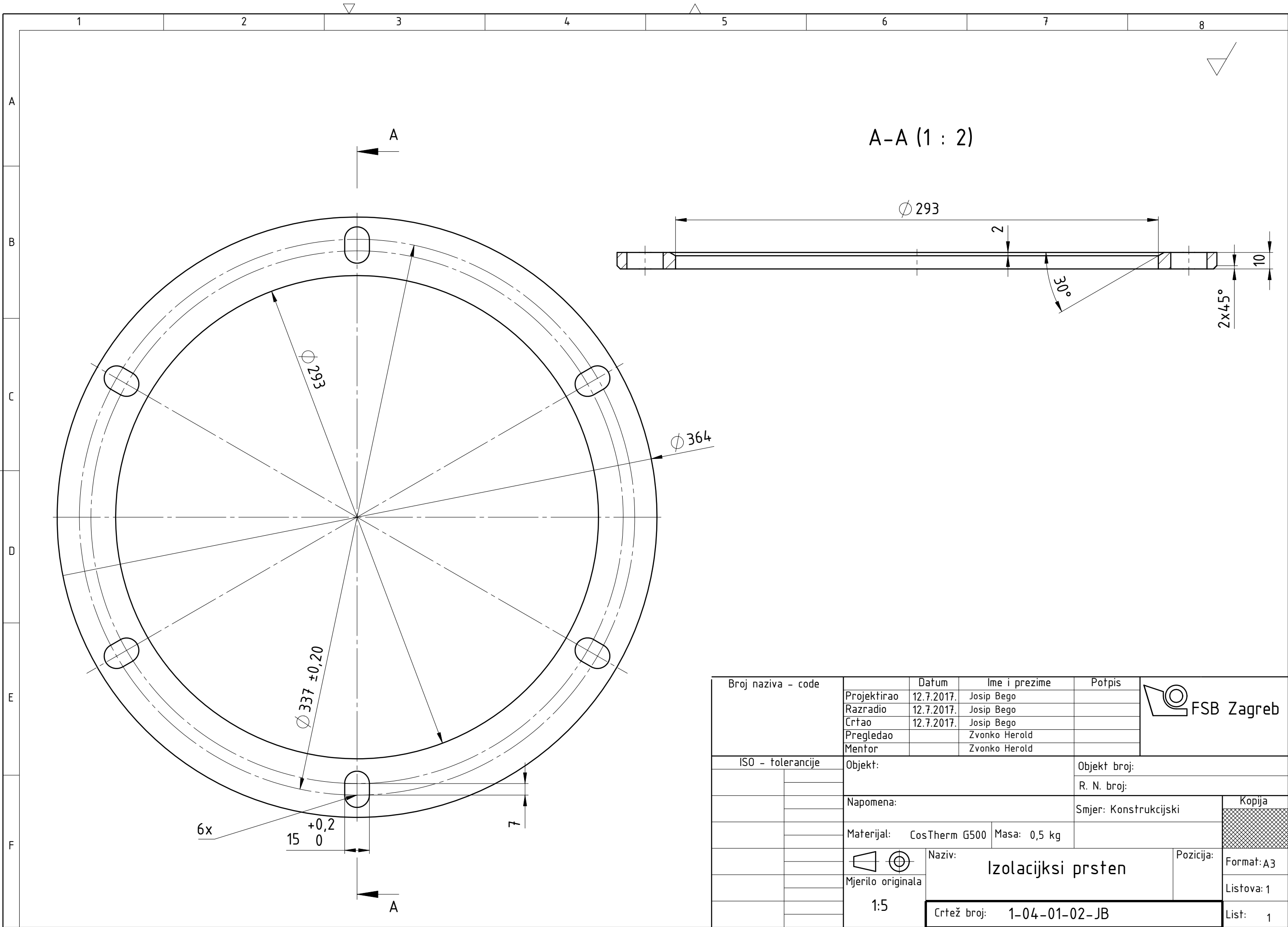


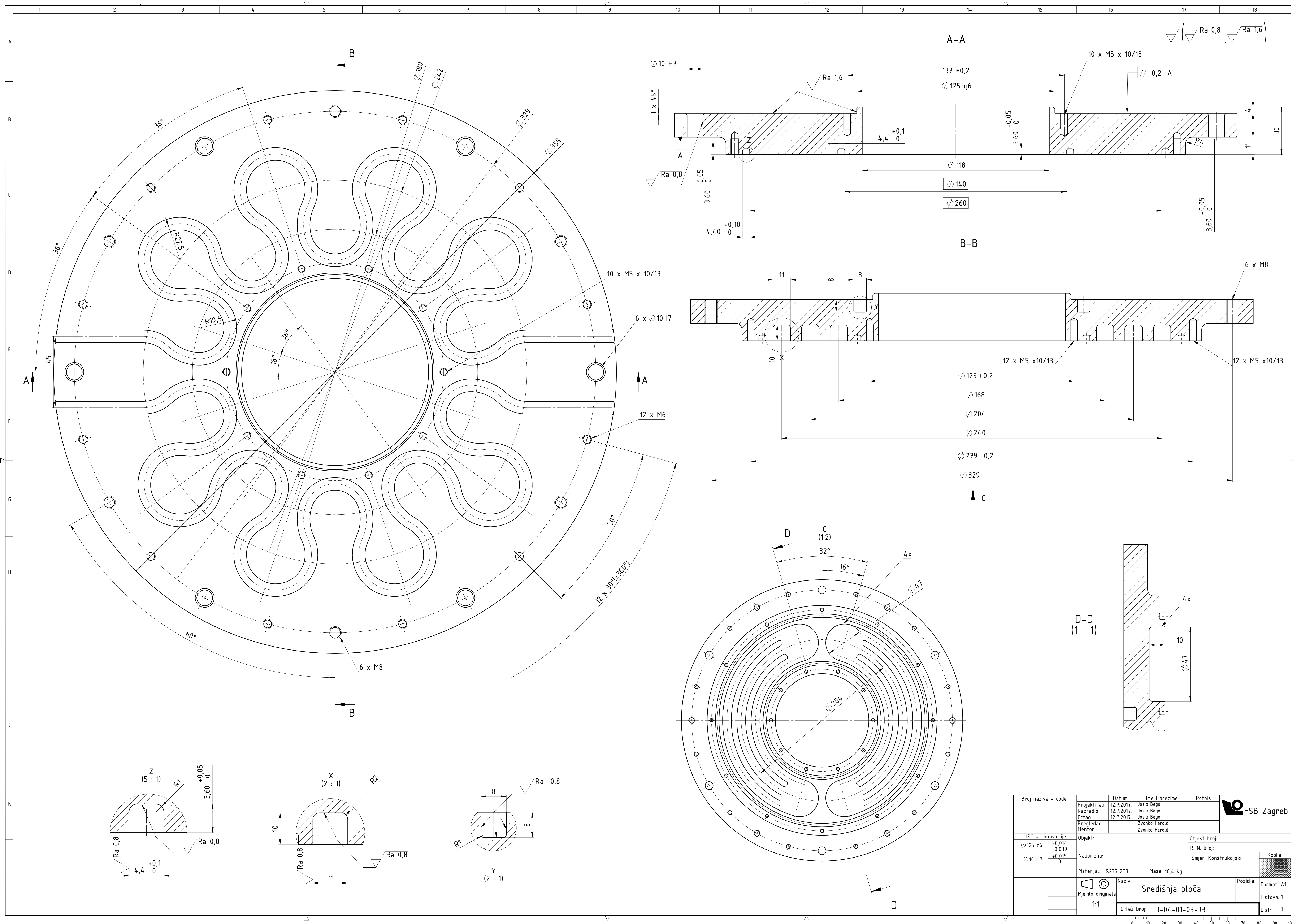


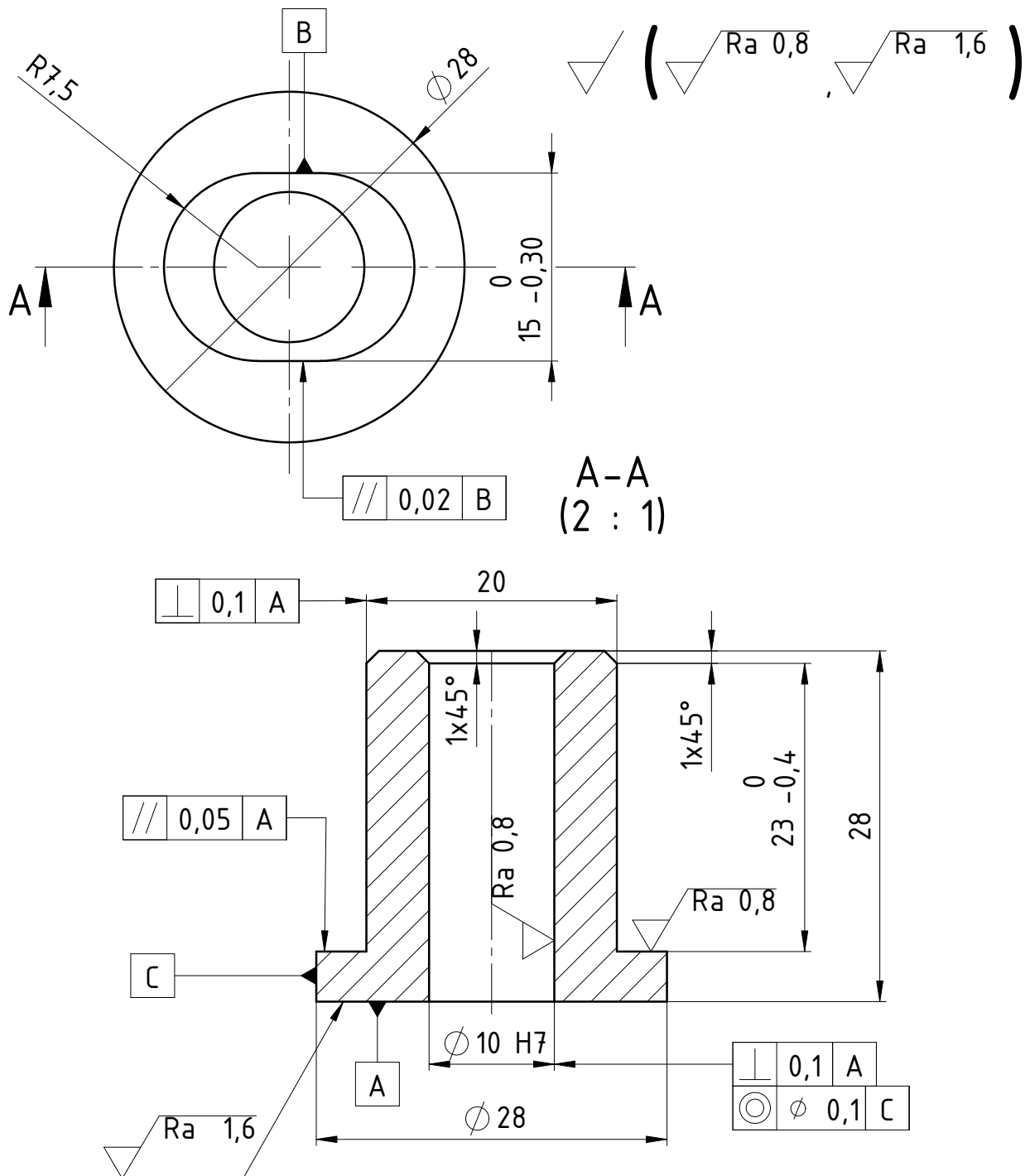


23	Vijak DIN 7984 M6 x 14	12	DIN 7984	8.8	M6 x 14	0,004
22	Vijak DIN EN 24017 M5 x 16	22	DIN EN 24017	8.8	M5 x 16	0,004
21	Električni grijač	2	1-04-01-09-JB	Kanthal D	-	0,045
20	Unutarnja brtva	1	OR 401300-PT00	PTFE	Trellborg	0,012
19	Vanjska brtva	1	OR 402600-PT00	PTFE	Trellborg	0,024
18	Vijak DIN 912 M6 x 25	12	DIN 912	12.9	M6 x 25	0,008
17	Vijak DIN 7991 M5 x 12	10	DIN 7991	8.8	M5 x 12	0,005
16	Vijak DIN EN 24017 M5 x 10	10	ISO 4017	8.8	M5 x 10	0,003
15	Vijak DIN 7991 M8 x 20	6	DIN 7991	12.9	M8 x 20	0,002
14	Matica DIN6923-M8	6	DIN 6923-M8-N	12	M8	0,02
12	Dosjedni vijak ISO 7379 10-M8-40	6	ISO 7379	12.9	10-M8-50	0,5
11	Troosni senzor	3	9327 C	-	Kistler	0,5
9	Pritezni prsten	1	1-04-01-08-JB	S 235J2G3	$\phi 350 \times 11$	1,7
8	Polisna ploča	1	1-04-01-07-JB	ovisno o vratilu	max $\phi 350 \times 11$ ; min $\phi 150 \times 10$	2
6	Prihvatač zamašnjaka/potisne ploče	1	1-04-01-06-JB	C45E	$\phi 306 \times 8$	4
5	Brtvena ploča	1	1-04-01-05-JB	S 235J2G3	$\phi 290 \times 5$	3,4
4	Klizna čahura	6	1-04-01-04-JB	C45	$\phi 28 \times 34$	0,055
3	Središnja ploča	1	1-04-01-03-JB	S 235J2G3	$\phi 350 \times 4,4$	16,4
2	Izolacijski prsten	1	1-04-01-02-JB	G-500	COS Therm	0,5
1	Prirubnica reaktivnog elementa	1	1-04-01-01-JB	S 235J2G3	$\phi 510 \times 58$	23
Poz	Naziv dijelova	Kom	Crtež Broj Norma	Materijal	Sirove dimenzije proizvođač	Masa (kg)
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis		
Projektirao		12.7.2017.	Josip Bego			
Razradio		12.7.2017.	Josip Bego			
Crtao		12.7.2017.	Josip Bego			
Pregledao			Zvonko Herold			
Mentor			Zvonko Herold			
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
$\phi 130$ H7/g6		Napomena:			R. N. broj:	
$\phi 125$ H7/g6		Materijal:			Smjer: Konstrukcijski	
$\phi 10$ H7/f9		Masa: 55 kg			Kopija	
$\phi 170$ H7/g6		Naziv: Reaktivni član			Format: A1	
Mjerilo originala		Pozicija:			Listova: 1	
1:5		Crtež broj: 1-04-01-00-JB			List: 1	

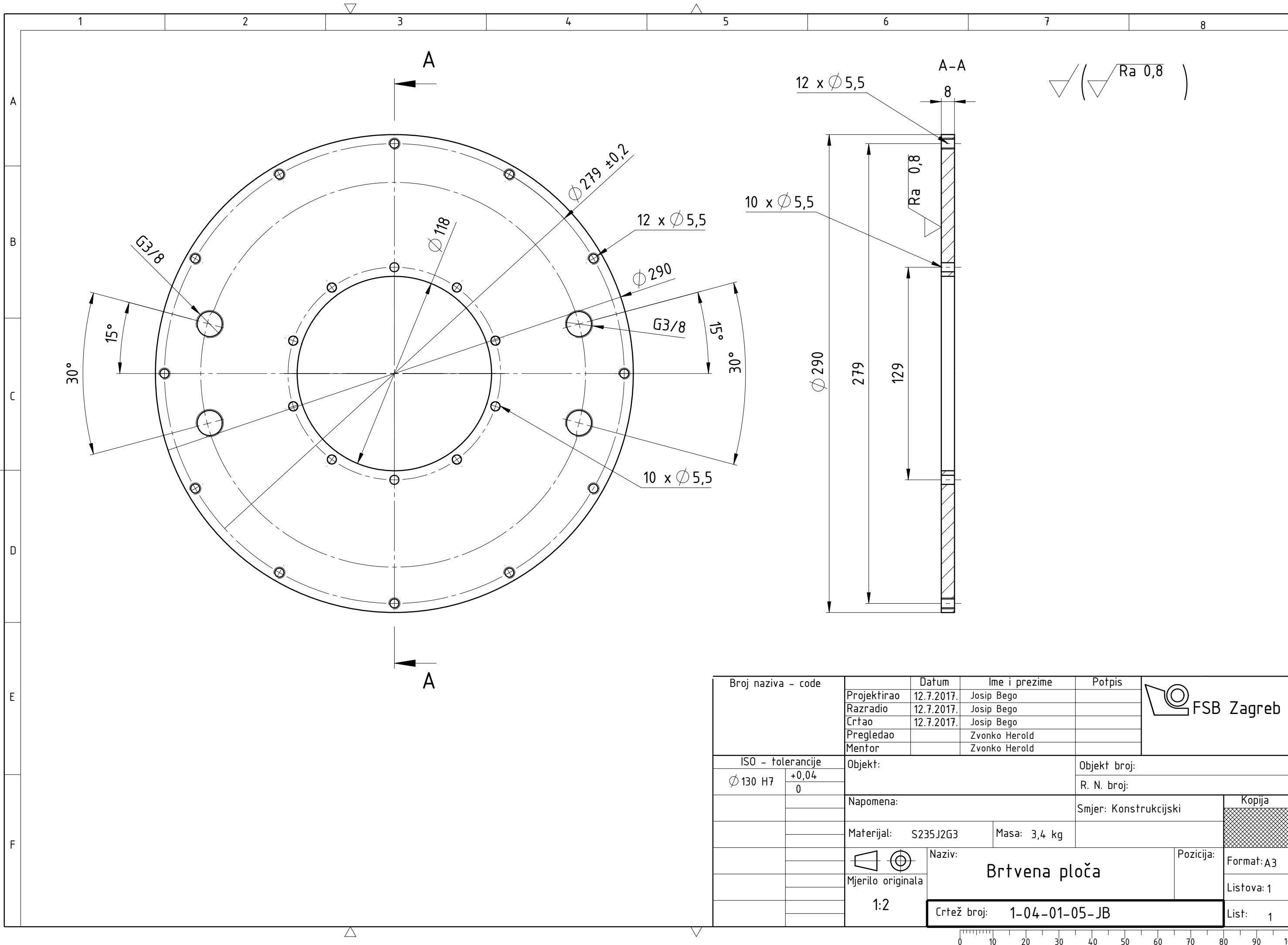




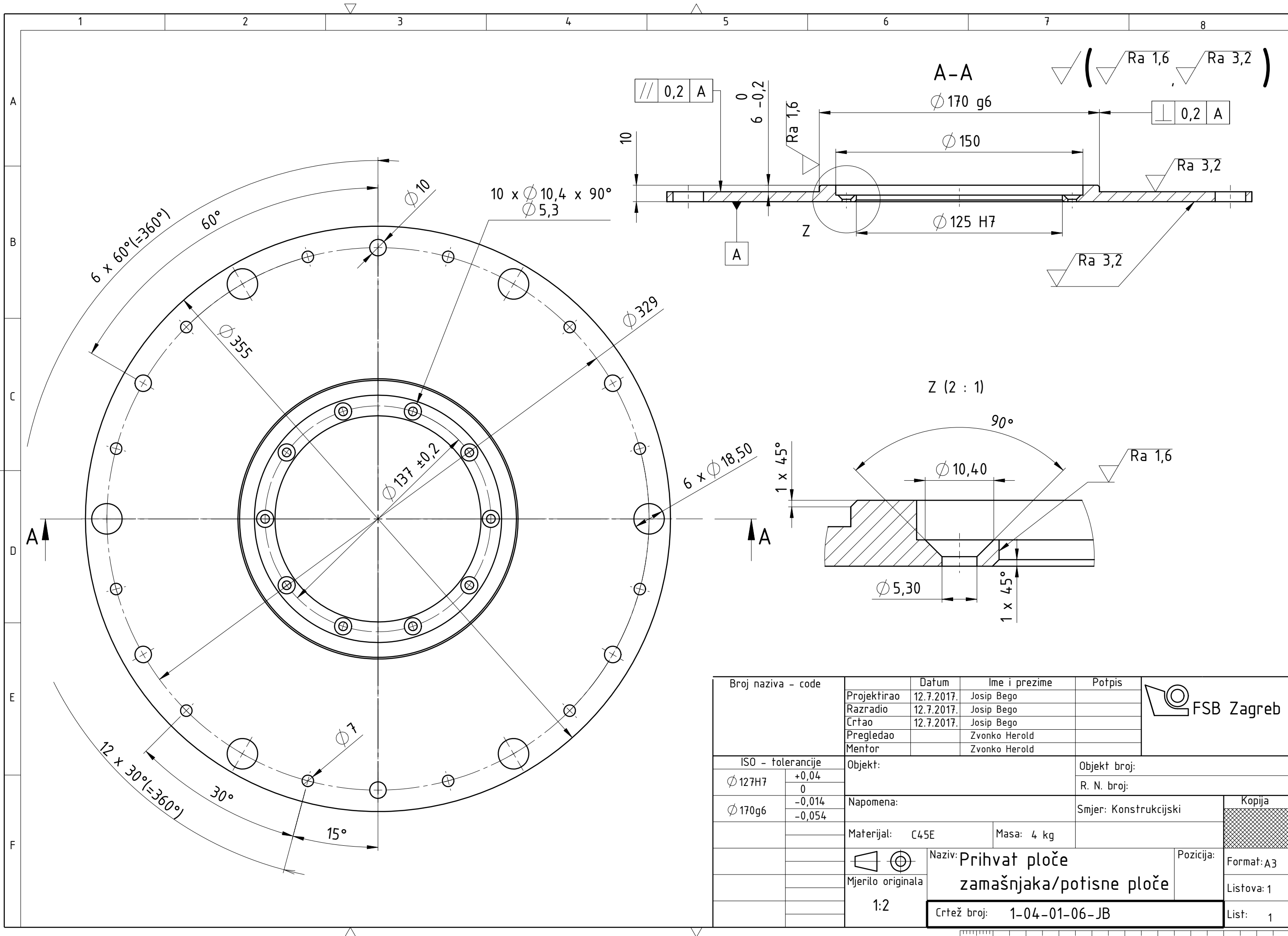


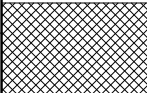



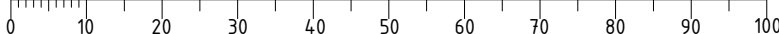
Broj naziva - code			Datum	Ime i prezime		Potpis	 FSB Zagreb		
		Projektirao	2.6.2015.	Josip Bego					
		Razradio	2.6.2015.	Josip Bego					
		Crtao	2.6.2015.	Josip Bego					
		Pregledao		Zvonko Herold					
		Mentor		Zvonko Herold					
ISO - tolerancije		Objekt:				Objekt broj:			
Ø 10 H7	+0,015					R. N. broj:			
	0								
		Napomena:				Smjer: Konstrukcijski		Kopija	
								Materijal: C45	
				Naziv: Klizna čahura				Pozicija:	Format: A4
									Mjerilo originala
		1:1		Crtež broj: 1-04-01-04-JB				List: 1	

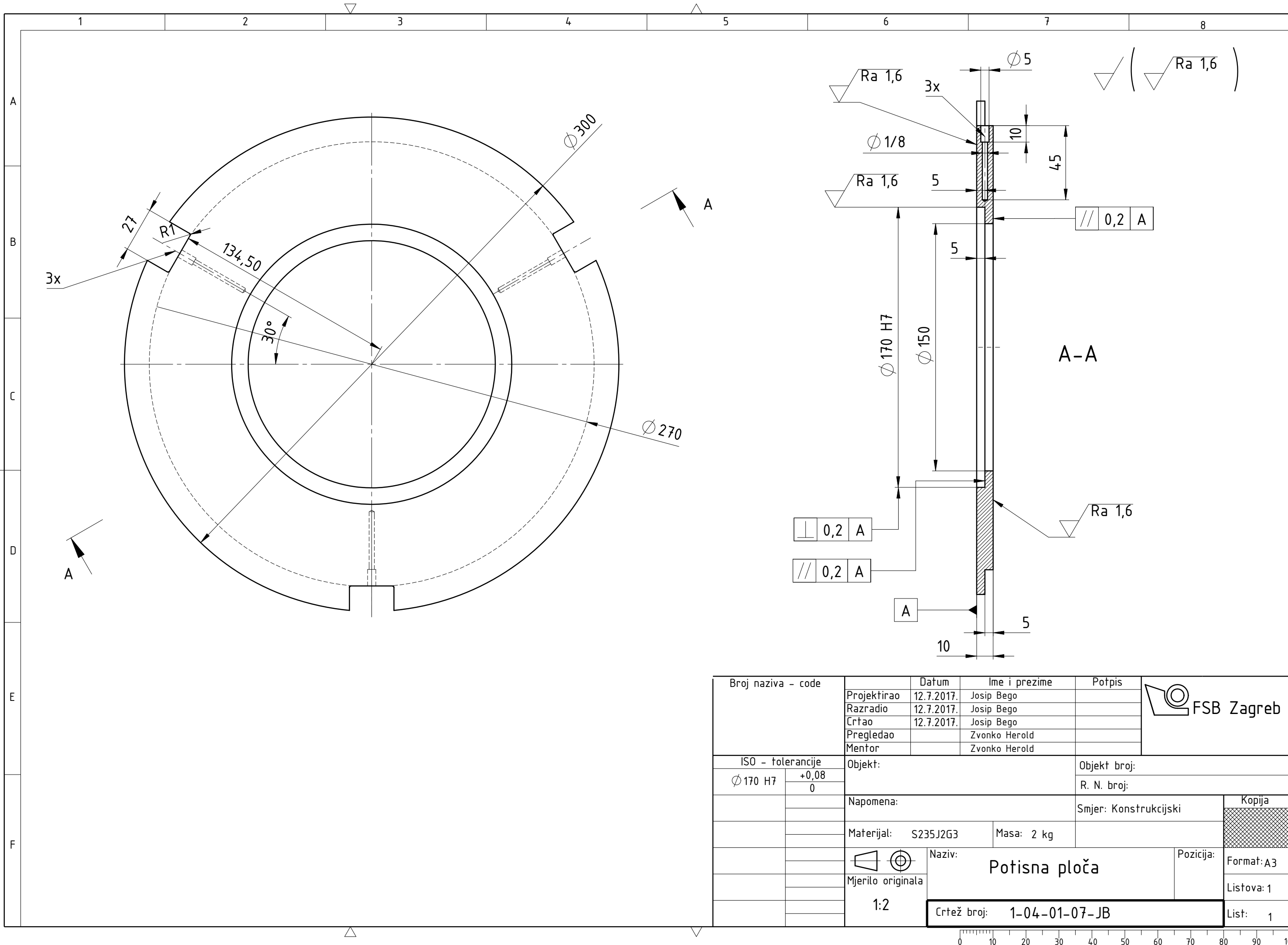



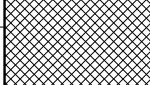
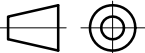
Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
		Projektirao	12.7.2017.	Josip Bego		
		Razradio	12.7.2017.	Josip Bego		
		Crtao	12.7.2017.	Josip Bego		
		Pregledao		Zvonko Herold		
Mentor				Zvonko Herold		
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:	
$\phi 130$ H7	$+0,04$ 0				R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: Konstrukcijski	
		Materijal: S235J2G3			Masa: 3,4 kg	
		Naziv:			Pozicija:	
		Mjerilo originala			Format: A3	
		1:2			Listova: 1	
		Crtež broj: 1-04-01-05-JB			List: 1	

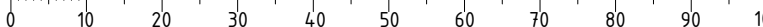


Broj naziva - code		Datum		Ime i prezime		Potpis		 FSB Zagreb	
		Projektirao		12.7.2017.	Josip Bego				
		Razradio		12.7.2017.	Josip Bego				
		Crtao		12.7.2017.	Josip Bego				
		Pregledao			Zvonko Herold				
		Mentor			Zvonko Herold				
ISO - tolerancije		Objekt:					Objekt broj:		
Ø 127H7	+0,04						R. N. broj:		
	0								
Ø 170g6	-0,014	Napomena:					Smjer: Konstrukcijski		Kopija
	-0,054								
		Materijal: C45E		Masa: 4 kg					
			Naziv: Prihvat ploče					Pozicija:	Format: A3
									zamašnjaka/potisne ploče
			Mjerilo originala	Crtež broj: 1-04-01-06-JB					
									1:2

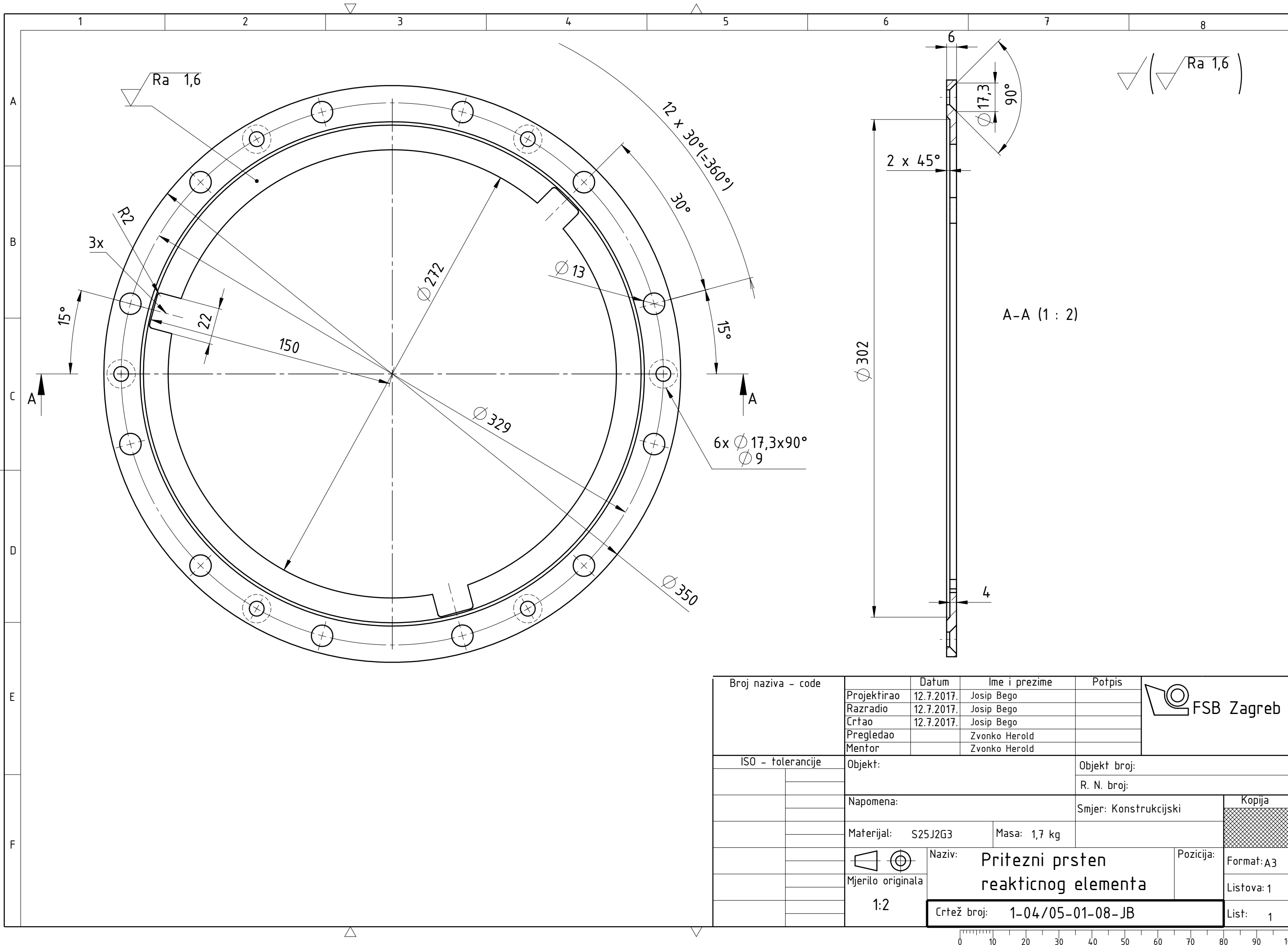






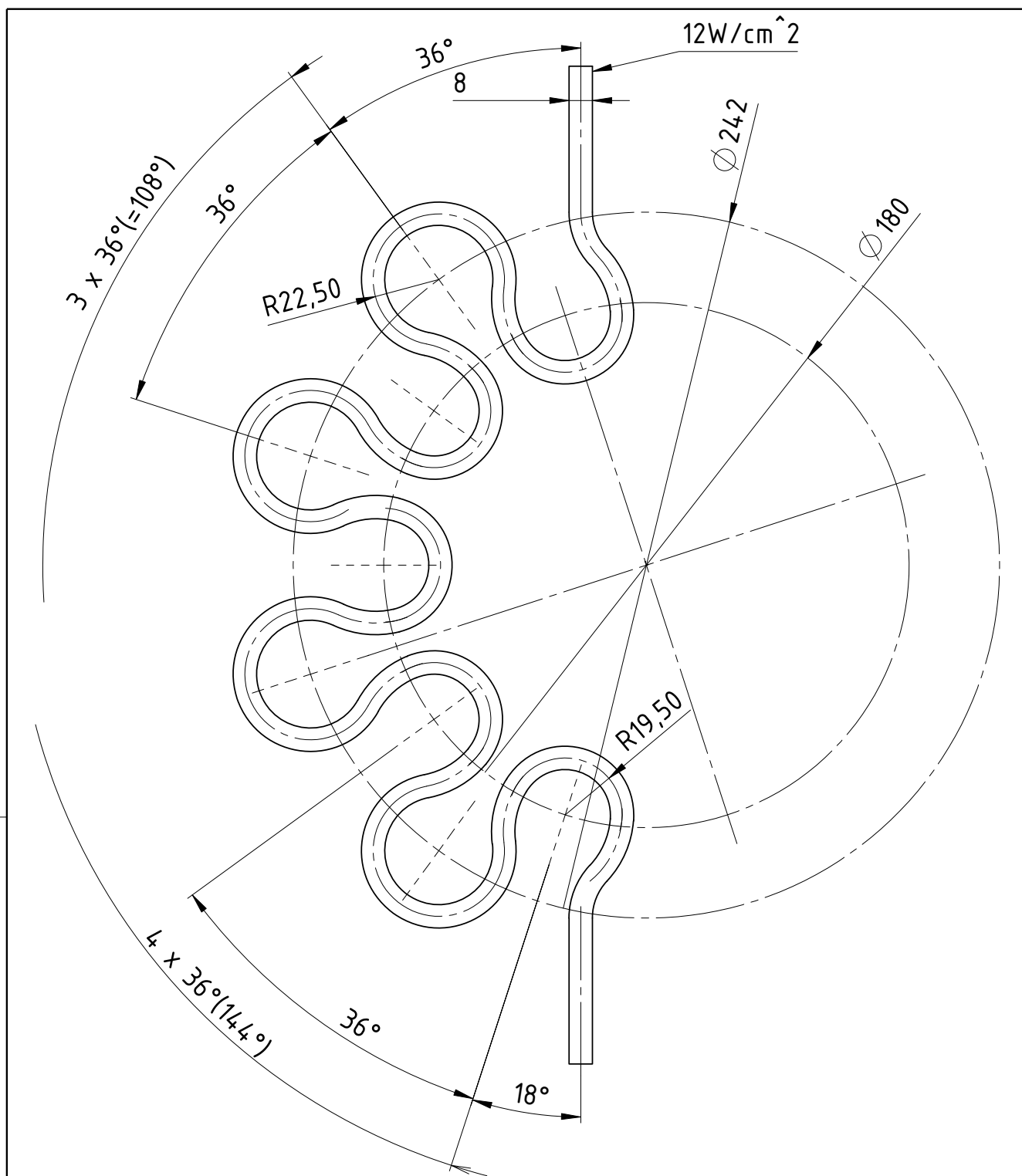
Broj naziva - code		Projektirao	12.7.2017.	Josip Bego	Potpis	 FSB Zagreb	
		Razradio	12.7.2017.	Josip Bego			
		Crtao	12.7.2017.	Josip Bego			
		Pregledao		Zvonko Herold			
		Mentor		Zvonko Herold			
ISO - tolerancije		Objekt:			Objekt broj:		
Ø 170 H7	+0,08 0				R. N. broj:		
		Napomena:			Smjer: Konstrukcijski		Kopija
		Materijal: S235J2G3		Masa: 2 kg			
		 Mjerilo originala  1:2	Naziv: Potisna ploča			Pozicija:	Format: A3
							Listova: 1
			Crtež broj: 1-04-01-07-JB				List: 1







Broj naziva - code		Projektirao	12.7.2017.	Ime i prezime		Potpis	 FSB Zagreb	
		Razradio	12.7.2017.	Josip Bego				
		Crtao	12.7.2017.	Josip Bego				
		Pregledao		Zvonko Herold				
		Mentor		Zvonko Herold				
ISO - tolerancije		Objekt:				Objekt broj:		
						R. N. broj:		
		Napomena:				Smjer: Konstrukcijski		Kopija
						Materijal: S25J2G3		Masa: 1,7 kg
			Naziv: Pritezni prsten reakticnog elementa				Pozicija:	Format: A3
								Mjerilo originala
			1:2	Crtež broj: 1-04/05-01-08-JB				List: 1



Broj naziva - code		Datum	Ime i prezime	Potpis	 FSB Zagreb	
	Projektirao	2.6.2017.	Josip Bego			
	Razradio	2.6.2017.	Josip Bego			
	Crtao	2.6.2017.	Josip Bego			
	Pregledao		Zvonko Herold			
	Mentor		Zvonko Herold			
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:		
					R. N. broj:	
		Napomena:			Smjer: Konstrukcijski	Kopija
		Materijal: Kanthal D			Masa: 0,045kg	
			Naziv:			Pozicija:
		Mjerilo originala	Električni grijač			Format: A4
		1:2				Listova: 1
			Crtež broj: 1-04-01-09-JB			List: 1

Električni grijač